

EDGAR ALBERTI ANDRZEJEWSKI

**AVALIAÇÕES NUMÉRICAS DE CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO:  
SUBSÍDIOS PARA PROJETOS DE CIRCUITOS DE GERAÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos, pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Eloy Kaviski

Co-orientador: Prof. André Luiz Tonso Fabiani.

CURITIBA

2009



**AVALIAÇÕES NUMÉRICAS DE CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO – SUBSÍDIOS PARA  
PROJETOS DE CIRCUITOS DE GERAÇÃO.**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

Orientador: Prof. Eloy Kaviski

Co-orientador: Prof. André Luiz Tonso Fabiani

---

Prof. Cláudio Marchand Krüger  
Universidade Positivo

---

Prof. Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes  
Universidade Federal do Paraná

---

Prof. Eloy Kaviski  
Universidade Federal do Paraná

---

Prof. André Luiz Tonso Fabiani  
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 29 de junho de 2009.

Dedico este trabalho  
à minha avó **Iria Hey Andrzejewski**, um exemplo de força e vida.

## **AGRADECIMENTOS**

*Aos meus pais Ricardo Hey Andrzejewski e Solange Alberti Andrzejewski, pelo contínuo incentivo nesta e nas diversas etapas do meu período de estudante; e também, pela ajuda no ano de 2007.*

*Ao Professor Eloy Kaviski, que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho devido aos seus ensinamentos de matemática e hidráulica, como aos auxílios nos conceitos envolvidos e produção das rotinas de cálculos computacionais.*

*À minha avó Iria Hey Andrzejewski, pelo carinho, companhia e disposição em permitir minha estadia em sua casa no ano de 2007.*

*Aos meus avós Valdomiro Loures Alberti e Any Delatre Alberti pelo apoio, incentivo e carinho.*

*Aos Engenheiros colegas de trabalho e amigos Sérgio Corrêa Pimenta e Nelson Dornelas pela força e incentivo de minha especialização técnica e profissional.*

*À Leme Engenharia e principalmente ao Engenheiro Demóstenes Gonçalves Pinheiro, por permitir aos colaboradores se especializarem através de cursos de pós-graduação.*

*Aos Professores Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes e Sérgio Michelotto Braga, pelo esforço conjunto no desenvolvimento da chaminé de equilíbrio, instalação dos instrumentos de medição e facilitar o inteiro andamento do processo de tomada de dados. E por me receber sempre quando necessário no Laboratório Didático de Hidráulica.*

*Ao LACTEC e ao Professor André Luiz Tonso Fabiani, por emprestar o software WANDA, pelos ensinamentos e auxílio em questões da chaminé de equilíbrio.*

*Aos colegas que em algum momento me auxiliaram na pesquisa e dissertação: Leonardo Hoffmann, Dado Bassetti, Artur Sass Braga, Michael Mannich, Ronaldo Zacarias da Silva, Gustavo Coimbra Amaral e Eduardo Francischelli.*

*À minha namorada Giovana Ribas Bassetti, por compreender as inúmeras horas de lazer sacrificadas, pelo suporte, amor e por acreditar.*

*E aos demais que fizeram a diferença.*

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	GERAL .....	1
1.2	OBJETIVOS .....	3
1.3	JUSTIFICATIVA.....	4
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	6
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>8</b>
2.1	GERAL .....	8
2.2	APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS .....	8
2.3	ARRANJOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS .....	10
2.4	CIRCUITO HIDRÁULICO TÍPICO DE USINA DE ALTA QUEDA.....	13
2.4.1	Tomada de Água .....	14
2.4.2	Túneis de Baixa Pressão.....	14
2.4.3	Túneis/Condutos Forçados .....	14
2.4.4	Casa de Força .....	16
2.4.5	Válvulas e Distribuidores .....	17
2.5	PCH – PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.....	19
2.6	ESCOAMENTO EM CONDUTOS FORÇADOS .....	20
2.6.1	Escoamento Permanente em Conduto Forçado Simples.....	20
2.6.2	Escoamento Não-Permanente em Condutos Forçados .....	22
2.6.3	Escoamento de Fluido Compressível .....	31
2.6.4	Golpe de Aríete .....	34
2.7	ESTUDOS DOS TRANSIENTES.....	38
2.8	CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO.....	40
2.9	TRATAMENTO ANALÍTICO DOS TRANSIENTES E GOLPES DE ARÍETE.....	44
<b>3</b>	<b>MÉTODOS ANALISADOS .....</b>	<b>47</b>
3.1	GERAL .....	47

3.2	Modelo da Aceleração da Massa de Água no Conduto de Adução.....	48
3.3	MODELO DAS CARACTERÍSTICAS - WANDA.....	53
3.4	MÉTODOS POR DIFERENÇAS FINITAS .....	59
3.4.1	Diferenças Finitas pelo Esquema Difusivo de Lax.....	60
3.4.2	Esquema de Diferenças Finitas Linearizado por Preissmann .....	65
3.5	CRITÉRIOS DA ELETROBRÁS .....	69
3.5.1	Diretrizes para Instalação de Chaminé de Equilíbrio em PCHs .....	79
<b>4</b>	<b>PROTÓTIPO DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO .....</b>	<b>86</b>
4.1	GERAL .....	86
4.2	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO .....	93
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÕES .....</b>	<b>95</b>
5.1	MODELO DA ACELERAÇÃO DA MASSA DE ÁGUA NO CONDUTO DE ADUÇÃO.....	95
5.2	MODELO WANDA.....	98
5.2.1	Coluna de Água Rígida - CR.....	98
5.2.2	Coluna de Água Elástica - CM .....	99
5.3	MODELOS DE DIFERENÇAS FINITAS .....	101
5.3.1	Método Difusivo de Lax.....	101
5.3.2	Esquema de Diferenças finitas linearizado de Preissmann.....	102
5.4	CRITÉRIOS DA ELETROBRÁS/PCHs.....	104
5.5	SIMULAÇÕES REALIZADAS NO PROTÓTIPO.....	109
<b>6</b>	<b>COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>110</b>
6.1	RESUMO DOS RESULTADOS.....	110
6.2	EDO1 x EDO2 x PROTÓTIPO .....	112
6.3	WANDA-CR x WANDA-CM .....	114
6.4	ELETROBRÁS x PROTÓTIPO.....	115
6.5	EDO2 x WANDA-CR x DF-LAX.....	116

<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>119</b>
7.1	GERAL .....	119
7.2	MODELO DE ACELERAÇÃO DA MASSA DE ÁGUA NO CONDUTO DE ADUÇÃO.....	119
7.3	ESQUEMA DIFUSIVO DE LAX.....	120
7.4	ESQUEMA DE DIFERENÇAS FINITAS LINEARIZADO POR PREISSMANN 120	
7.5	RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO .....	120
7.6	GOLPE DE ARÍETE OBSERVADO NO SENSOR .....	121
7.7	FORÇA DE INÉRCIA E TENSÃO SUPERFICIAL NA CHAMINÉ.....	121
7.8	RECOMENDAÇÕES .....	122
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>123</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>126</b>



## RESUMO

Estudar detalhadamente os transientes hidráulicos dos circuitos de geração de usinas hidrelétricas de alta queda e as oscilações de água nas chaminés de equilíbrio pode indicar otimizações importantes nas estruturas hidráulicas e defini-las economicamente. Com a atual disponibilidade dos recursos computacionais, diferentes métodos de resolução das equações do escoamento não-permanente em condutos podem ser desenvolvidos.

O objetivo desta dissertação é realizar a comparação entre os resultados de métodos de resolução de chaminés de equilíbrio, baseados em métodos numéricos de diferentes complexidades, com os resultados obtidos de um protótipo instalado em laboratório hidráulico.

Quatro métodos são comparados: o primeiro considera o fenômeno como de aceleração da massa de água no conduto forçado, o segundo corresponde à solução das equações do escoamento não-permanente a partir das curvas características, o terceiro método soluciona as equações do escoamento não-permanente por diferenças finitas discretizadas pelo esquema difusivo de Lax e o quarto pelos critérios editados pela ELETROBRÁS.

O segundo e o quarto método são amplamente utilizados pelos projetistas devido à simplificações das equações, estas necessárias para a resolução.

Em geral, todos os métodos apresentaram resultados condizentes com as observações do protótipo. Os modelos computacionais tiveram maiores discrepâncias nos resultados de abertura da válvula. A maior diferença observada entre todos os resultados observados foi referente ao método de cálculo pelos critérios da ELETROBRÁS, mas soluciona a estrutura a favor da segurança. Para estudos preliminares de chaminés de equilíbrio são adequados, mas para etapas posteriores podem indicar estruturas antieconômicas.

## **ABSTRACT**

The detailed study of the hydraulic transients of water power circuits of high head hydropower plants and the design of surge tanks is an effort that can indicate the need for substantial changes of the structures, and the opportunity for defining them more economically. With the present easy and cheap availability of computational resources different computational methods for the solution of the non-permanent flow equations in conduits can be developed without major difficulties. The aim of this dissertation is the comparison among the results of computational models based on numerical methods of different complexities and the data taken from a prototype installed in a hydraulic laboratory.

Basically four methods were compared: the first is based on ordinary differential equations of the permanent flow. The second one corresponds to the solution of the non-permanent flow equations by the characteristic method and the third is based on the criteria edited by ELETROBRÁS. The second and the third methods are widely used by designers because its simplicity. The forth is the solution of the variable flow by the Lax diffusive scheme using Pascal computer language and finite differences method.

Generally all four methods presented results adherent to the prototype data. The computational methods have only shown greater differences on the valve opening data. The exception resulted from the application of ELETROBRÁS' criteria that showed major differences and conservative results, generally leading to anti economic design. Thus this method is just applicable for preliminary studies.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 GERAL

A viabilidade em utilizar os recursos hídricos nacionais para a geração de energia elétrica faz com que 71,2% das usinas em operação sejam hidroelétricas (ANEEL, 2009). Recentemente, com maior saturação dos grandes aproveitamentos hidrelétricos, a maior facilidade de concessão ambiental e o maior interesse dos investidores privados permitiram desenvolver o mercado de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH).

Em tempos de gás racionado e consumo crescente de energia, as hidrelétricas voltam à pauta do dia nas discussões sobre as alternativas energéticas brasileiras. Embora a geração de energia a partir da cana-de-açúcar tenha ultrapassado a hídrica em 2007, esta desponta como opção interessante, sob novo formato: o das Pequenas Centrais Hidrelétricas (CARDOSO, 2008).

Muitas PCHs (pequenas centrais hidrelétricas), usinas que possuem características conforme definidas no capítulo 2.5, são classificadas como usinas de alta queda, podem estar localizadas nas cabeceiras dos rios e utilizam-se das pequenas vazões e grandes quedas para a geração. No Brasil estão sendo construídos 72 empreendimentos do porte PCH (ANEEL, 2009).

O mercado de usinas de pequeno, médio e grande porte que aproveitam as grandes quedas está se direcionando também para o perímetro das regiões montanhosas da América Latina e Ásia, ou seja, principalmente nos países emergentes montanhosos e carentes de energia como os da região dos Andes, Panamá e China.

Segundo Cardoso (2008) *apud* AIE - Agência Internacional de Energia, a tendência de crescimento do consumo energético na América Latina (incluindo Caribe) demandará 75% a mais de energia em 2030 em relação a 2004.

Além disto, no passado recente do nosso país foi dada bastante atenção para o desenvolvimento de usinas de grande porte, que aproveitam os locais de rios com grandes potenciais energéticos, quase sempre de baixa queda.

Portanto, se observou um aumento na necessidade de definir circuitos de geração de alta queda e os estudos de transientes hidráulicos voltam a ser mais freqüentes devido a novas necessidades de definição destes aproveitamentos.

Projetar estruturas do circuito de geração de usinas de alta queda obriga considerável volume de trabalho em todos os elementos da engenharia. A otimização do dimensionamento dos circuitos sob pressão requer prever riscos estruturais corretamente. Deste modo, a previsão do comportamento do transiente em um determinado conduto de adução, condutos forçados e poços de queda é de essencial importância para garantir a integridade das estruturas civis bem como dos elementos eletromecânicos, devido ao golpe de aríete.

Os grandes condutos forçados de adução necessitam, quase sempre, de dispositivos que amortecem a sobre pressão do escoamento causado por um transiente, ou seja, pelo golpe de aríete. Este problema é tão mais agudo quanto maior for o comprimento dos condutos forçados com relação à queda da usina (ELETROBRÁS, 2003).

Esses circuitos de usinas hidrelétricas (UHEs) são projetadas chaminés de equilíbrio para combater o problema do golpe de aríete nos condutos e permitir os limites das faixas de regulação da carga por parte das turbinas. Entre estas razões, Pinto (1987) descreve que as chaminés de equilíbrio são utilizadas nos condutos de adução para reduzir o comprimento sujeito ao golpe de aríete e em consequência a sobre pressão resultante.

Para o projeto destas estruturas, os métodos de análise das oscilações de água em chaminés de equilíbrio são baseados nas equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento e de relações entre propriedades físicas associadas ao escoamento e ao golpe de aríete. Mas, os diferentes métodos de cálculo resolvem as equações com certa variação nos resultados.

A partir de 1960, com o surgimento e aprimoramento dos computadores digitais, novos métodos e modelos numéricos computacionais resolveram as rotinas de cálculo pelas Curvas Características, obtendo sucesso nas soluções de uma variedade de problemas de transientes (LESSA, 1984).

Contudo, a falta de dados disponíveis relativos à operacionalidade das diferentes máquinas de geração hidráulica ou válvulas atribuídas às usinas de alta queda torna a análise da resposta dinâmica do sistema menos confiável, induzindo,

frequentemente, ao emprego de formulações empíricas com elevado grau de incerteza e pouco domínio real do comportamento do sistema. Estas incertezas induzem a um tratamento com coeficientes de extrapolação altos, garantindo a segurança do projeto, mas não a economia do empreendimento.

Quando bem definidas as envoltórias do problema, ou seja, regulação dos distribuidores, válvulas, níveis, dimensões, o tratamento do transiente nos condutos forçados e chaminés está cada vez mais eficaz através dos modelos computacionais que proporcionam cálculos mais elaborados para cada parcela da formulação referente.

Os escoamentos variáveis sob pressão caracterizam-se pela modificação da velocidade média e da pressão, ao longo do tempo, em qualquer secção transversal do conduto. Podem ser provocados, por exemplo, por manobras de válvulas ou por variação do regime de funcionamento de turbinas. Os escoamentos variáveis que asseguram a passagem de um regime permanente para outro regime permanente são chamados transitórios (KAVISKI, CUMIN e PRADO, 2006).

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em comparar os critérios e métodos de cálculo praticados na engenharia de hidrelétricas, para análise do comportamento de uma chaminé de equilíbrio instalada em um circuito de geração, contemplando um pequeno protótipo (modelo reduzido genérico de uma usina hidrelétrica) para conferência da fidelidade dos cálculos. Adicionalmente, pretende-se consolidar um documento de pesquisa onde o projetista possa visualizar e decidir na prática o melhor tratamento dos transientes voltado à oscilação de massa no interior da chaminé. Com isto, garantindo subsídios para a decisão de arranjos de circuitos de geração de alta queda.

Os objetivos específicos são os seguintes:

a) Agrupar informações didáticas que tratam dos estudos de chaminés de equilíbrio de arranjos de usinas de alta queda;

- b) Apresentar métodos e ferramentas mais utilizadas pelos projetistas que simulam as oscilações do nível de água no interior de chaminés de equilíbrio;
- c) Ajudar a desenvolver, para pesquisa, o protótipo físico da chaminé de equilíbrio instalada no Laboratório Didático de Mecânica dos Fluidos e de Hidráulica da UFPR - Universidade Federal do Paraná. Instalar no protótipo os dispositivos que permitam sua operação e aquisição de dados em tempo real;
- d) Apresentar rotinas do método de resolução pelas Curvas Características aplicadas em modelos de resolução comerciais usuais. Utilizar o programa computacional WANDA 3 do instituto holandês *Delft Hydraulics* para simular as oscilações resultantes das cálculos pelas Curvas Características;
- e) Desenvolver e aplicar um método de cálculo por diferenças finitas na linguagem de programação *Turbo Pascal* considerando as discretizações das equações diferenciais pelo esquema difusivo de Lax;
- f) Aplicar o método de resolução das equações diferenciais por diferenças finitas por Linearização de Preissmann usando o método da Dupla-Varredura;
- g) Aplicar os critérios de projeto de chaminés de equilíbrio baseados nas bibliografias elaboradas pela ELETROBRÁS;
- h) Comparar os resultados obtidos com ensaios em protótipo definindo níveis, fundamentos, qualidade dos resultados e possíveis divergências.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Muitas questões devem ser respondidas pelos profissionais de estudos energéticos em relação aos novos aspectos da geração hidrelétrica. Mesmo pequenas usinas, até 30 MW, contendo boas condições hidráulicas podem ter seu dimensionamento e economia comprometidos quando não são consideradas as faixas de operação do conjunto gerador (ASCE, 1989). A boa condição hidráulica, neste caso, refere-se às definições das estruturas que garantam um escoamento uniforme e eficiente para a geração. Para o sucesso do empreendimento é essencial convergir técnicas de modo a propiciar o perfeito funcionamento do circuito hidráulico em conjunto com os geradores e assim obter a maximização do retorno energético.

Geralmente, quando se produz uma ferramenta de resolução de transiente com chaminés de equilíbrio esta é “validada” e/ou calibrada quando comparada com um modelo comercial, baseado em métodos das características.

A partir da comparação e análise dos resultados entre estes métodos e um protótipo físico, pode-se definir a qualidade dos cálculos e deliberar a condição dos resultados esperados de cada um. Com isto, pretende-se auxiliar o projetista na escolha do método em cada momento do projeto é conveniente.

Em nosso País existe a tendência de crescimento da construção de mini e pequenas centrais de alta queda. Acredita-se que com o aumento da tecnologia estas usinas poderão ser automatizadas e operadas à distância, ou com pouca assistência operacional no local. Assim, as visitas de inspeção e manutenção das mesmas não necessariamente serão frequentes.

Em todo o Mundo houveram casos de ruptura de condutos sob pressão e avarias nos equipamentos hidráulicos de usinas hidrelétricas.

Embora um circuito possa aparentar funcionamento correto, quando subdimensionado, podem ocorrer danos por fadiga devido à periodicidade dos transientes, ou manobras de válvulas não previstas.

Em tempos atuais, onde o engenheiro necessita cada vez mais ser rápido e exato na definição do projeto, se torna favorável um estudo que contempla um agrupamento das definições dos fenômenos observados e dos métodos de resolução para auxiliar nas decisões de projeto.

Todo método usado para o cálculo dos transientes hidráulicos tem suas particularidades. Existem métodos que são completos, que procuram utilizar teorias que mais se aproximam do fenômeno real: que consideram a influência da deformação do material, que consideram o fluido como compressível, que necessitam de condições de contorno bem definidas, mas possuem formulações complexas.

Por outro lado, existem métodos que consideram os processos de forma simplificada, que necessitam de menos informações de partida e são de rápida resolução. Os diferentes problemas apresentados para os projetistas podem, conforme sua necessidade de definição, ser direcionados para um tipo ideal de análise ou nível de detalhamento. Em geral, comenta-se que, para um projeto de

viabilidade se utiliza um método de cálculo, para um pré-projeto, ou projeto básico, outro e assim por diante.

O método de resolução escoamento não-permanente por diferenças finitas por aproximação de Lax faz tratamento à todas as parcelas das equações diferenciais envolvidas, e pode trazer novas contribuições para o problema de transiente em condutos:

O método das características, por exemplo, praticamente tem sido a única alternativa considerada para solucionar numericamente as equações do escoamento não-permanente em condutos, de tal forma que são raros os trabalhos encontrados na literatura sobre abordagens alternativas computacionais. A realização de pesquisas para solucionar as equações do escoamento não-permanente em condutos por meio de outros métodos é de grande importância porque podem produzir contribuições inovadoras para a solução destes problemas (KAVISKI, CUMIN E PRADO, 2006).

Deste modo, com a comparação entre os resultados pode-se observar cada método de cálculo de oscilação de massa da chaminé de equilíbrio e deliberar vantagens e desvantagens.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação é dividida em sete (7) capítulos, sendo esta introdução o CAPÍTULO 1.

O CAPÍTULO 2 refere-se à revisão da bibliografia pertinente ao desenvolvimento do trabalho.

O CAPÍTULO 3 refere-se à descrição dos métodos analisados.

O CAPÍTULO 4 descreve o protótipo laboratorial, e apresenta o desenvolvimento da preparação da chaminé de equilíbrio: definição do tratamento e tomadas de decisões estruturais (aprimoramentos estruturais); instalação e análises dos instrumentos, preparação do sistema de aquisição de dados e definições das



faixas operacionais. Apresentam-se também as simulações realizadas no protótipo laboratorial.

O CAPÍTULO 5 apresenta as simulações realizadas pelos modelos matemáticos onde indicam-se as principais simplificações em cada caso.

O CAPÍTULO 6 apresenta as análises dos resultados. São apresentadas as comparações entre métodos de cálculo em relação à fidelidade do fenômeno de oscilações reais observadas. Definem-se a magnitude dos erros e apresentam-se comentários prós e contras.

O CAPÍTULO 7 apresenta as conclusões e as recomendações para a realização de estudos futuros.

Apresentam-se também cinco (5) APÊNDICES. Os seguintes assuntos são abordados: RESULTADOS EDO1, RESULTADOS EDO2, INTERFACE E RESULTADOS WANDA, PROGRAMAÇÃO LAX e RESULTADOS GERAIS.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 GERAL**

A revisão bibliográfica está organizada de forma a permitir um entendimento geral sobre o assunto.

No item 2.2 é sobre aproveitamentos hidrelétricos.

No item 2.3 são descritos os tipos de arranjos e suas respectivas estruturas necessárias para a geração de energia através do potencial hidráulico.

No item 2.4 apresentam-se as características das passagens hidráulicas do arranjo típico de usina de alta queda, mais direcionado ao interesse deste trabalho.

No item 2.5 são descritas as PCHs, usinas hidrelétricas de pequeno porte que podem ser, também, do tipo alta queda.

No item 2.6 são descritos os aspectos hidráulicos de escoamentos sob pressão, essencial para o entendimento dos fenômenos hidráulicos existentes em circuitos de geração de alta queda. Este item também auxilia na definição dos fatores de modelos de cálculos matemáticos de oscilações de massa em chaminés de equilíbrio.

No item 2.7 é apresentado um pequeno histórico dos principais estudos mais recentes referentes aos transientes de escoamentos sob pressão.

No item 2.8 são descritos os tipos de chaminés que podem ser instaladas em circuito de geração de usinas de alta queda, conforme a características da topografia, disponibilidade espacial, geologia e das estruturas do circuito de geração.

No item 2.9 é descrito como deve ser processada a análise dos transientes pelos profissionais de engenharia, de forma qualitativa e quantitativa.

### **2.2 APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS**

Numa usina hidrelétrica converte-se energia hidráulica gerada pela diferença de potencial, de um curso de água ou de um reservatório, em energia elétrica através dos geradores anexos à turbinas hidráulicas. Este objetivo, aparentemente simples para ser atingido exige uma série de obras de engenharia que podem assumir grandes proporções. Tudo depende de inúmeros fatores naturais, sociais,

técnicos e econômicos. Os fatores naturais estão principalmente ligados ao impacto ambiental quando algumas obras podem alterar de forma significativa a fauna e flora locais.

Como a natureza, através das chuvas (recurso hídrico), fornece a água de forma aleatória, torna-se imprescindível a obtenção de dados hidrológicos os mais confiáveis possíveis, de preferência pela observação e registro na escala de vários anos. E ainda, em alguns tipos de usinas hidrelétricas se faz necessária a regularização da vazão natural do rio para garantir geração nos períodos de estiagem. É possível que usinas hidrelétricas grandes tenham reservatórios e demais estruturas que afetam de algum modo as atividades humanas locais. Existem casos de remoção de cidades inteiras e inundações de lugares históricos devido a construção de usinas hidrelétricas. Tudo isso se viabiliza por haver no local potencial hidrelétrico para produzir energia a uma relação custo/benefício adequada. Essas questões são analisadas pelos órgãos ambientais responsáveis através do EIA-RIMA (Estudos de Impacto Ambiental e o Relatório de Impacto Ambiental) do sítio da construção (MASON, 1988).

Para complementar a viabilização da execução de uma UHE se estuda tecnicamente características técnicas do aproveitamento do ponto de vista das estruturas civis e eletromecânicas, sempre avaliadas em conjunto com o custo/benefício do empreendimento, como por exemplo: a queda do aproveitamento, vazão de projeto, volume de concreto, volumes de escavação, estudo energético, número de unidades geradoras, potência instalada, equipamentos eletromecânicos etc. O principal motivo técnico de viabilização do projeto de uma usina hidrelétrica é a alimentação da usina. A vazão de alimentação das turbinas deverá suprir de forma regular e ordenada de acordo com as solicitações da rede elétrica de demanda. Segundo Mason (1988), este objetivo só pode ser atingido se forem previstos dois órgãos essenciais em todo seu uso nas ocasiões de carência de água:

- a) Um reservatório capaz de acumular a água em excesso nas ocasiões de abundância para seu uso nas condições de carência; e,
- b) Um sistema de regulação das turbinas capaz de ajustar o fluxo hidráulico à demanda da rede elétrica.

Garantindo estes dois dispositivos essenciais, o restante pode ser resumido em obras de condução de água à casa de força, como condutos forçados, túneis, chaminés de equilíbrio, entre outros.

As usinas hidrelétricas são classificadas conforme o estudo “Manual Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas” (ELETROBRÁS, 1984):

Quanto à capacidade de regularização do reservatório:

a) A Fio d'Água: as usinas a fio d'água são empregadas quando as vazões de estiagem do rio são maiores ou iguais que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista.

Neste caso, despreza-se o volume do reservatório criado pela barragem. O sistema de adução deverá ser projetado para produzir a descarga necessária para fornecer a potência que atenda à demanda máxima. O aproveitamento energético local será parcial e o vertedouro funcionará na quase totalidade do tempo, extravasando o excesso de água.

b) De Acumulação: constituída por um reservatório que garanta uma alimentação constante de fluxo nas turbinas, reservando águas afluentes no período de cheia e descarregando águas no período de estiagem.

## 2.3 ARRANJOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

Devido às inúmeras características dos aproveitamentos hídricos no mundo, torna-se um problema de engenharia a determinação dos arranjos das estruturas gerais nas usinas hidrelétricas e a determinação dos locais ideais para a implantação do eixo da barragem e estruturas na bacia hidrográfica do rio.

As possibilidades de arranjos gerais dos órgãos de usinas hidrelétricas são múltiplas e variadas e é praticamente impossível enumerar todas elas ou apresentar classificações (MASON, 1988).

Após serem definidas as características energéticas de um local, a concepção do arranjo geral do aproveitamento hidrelétrico correspondente depende, em termos gerais, dos seguintes parâmetros: conformação topográfica; características geológicas e geotécnicas; descarga máxima turbinada; vazões de desvio e capacidade requerida para o vertedouro (ELETROBRÁS, 1984).

Levando em conta as informações acima são dimensionados os aproveitamentos e a integração das obras de infraestrutura do empreendimento aplicando as técnicas de engenharia e os materiais disponíveis *in loco*, ou mais adequados: acessos; benfeitorias; casa de força; desvio do rio; barragens; vertedouros; tomada de água e adutoras.

Mason (1988) complementa que os órgãos essenciais das usinas hidrelétricas são: a barragem para a formação do reservatório, a casa de força e os dispositivos de condução do fluxo (condutos forçados, túneis ou canais) à casa de força.

Em situações especiais poderá ser dispensável algum destes elementos, tais como a própria barragem ou órgãos de condução.

É relativamente comum a conjugação ou associação direta da barragem e da casa de força, com supressão de condutos ou túneis. A par dos elementos essenciais acima enumerados, que podem ser considerados os mais importantes de qualquer aproveitamento, podem existir uma série de outros elementos acessórios, tais como: descarga de fundo; comportas; canais de desvio (etapa de construção); câmaras de válvulas; válvulas de segurança de diversos tipos; e chaminé de equilíbrio.

Às vezes a condução do fluxo hidráulico à casa de força pode ocorrer através de canal aberto. Neste caso não seria necessária a verificação da possibilidade de implantar uma chaminé de equilíbrio de montante, assunto do presente estudo. Salienta-se que os condutos forçados e os poços de queda (quando verticais) funcionam sob pressão que, às vezes, podem atingir a ordem de centenas de metros de coluna d'água.

Segundo Macintyre (1983), em usinas hidrelétricas, dependendo naturalmente do tipo, é necessária a instalação de dispositivos especiais para a condução da água, controle e regulação da descarga. Fazem parte desses dispositivos as comportas, válvulas e os distribuidores.

Na UHE Salto Osório, por exemplo, todas as estruturas compõem-se na mesma região do aproveitamento e do tipo baixa queda. Na FIGURA 2.1 e na FIGURA 2.2 percebe-se que o conduto forçado é pequeno em distância e a queda é baixa, com isso não se faz necessária a implantação de uma chaminé de equilíbrio, motivo que no decorrer do trabalho será apresentado.

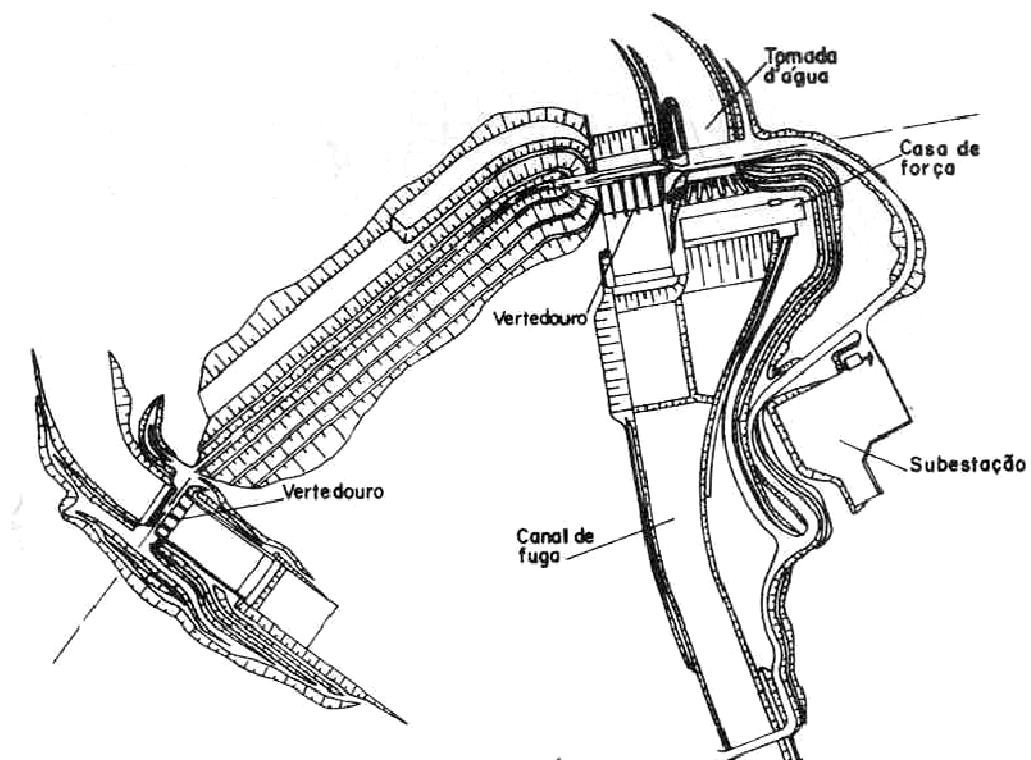


FIGURA 2.1 - Planta do Aproveitamento da UHE Salto Osório (MASON, 1988).

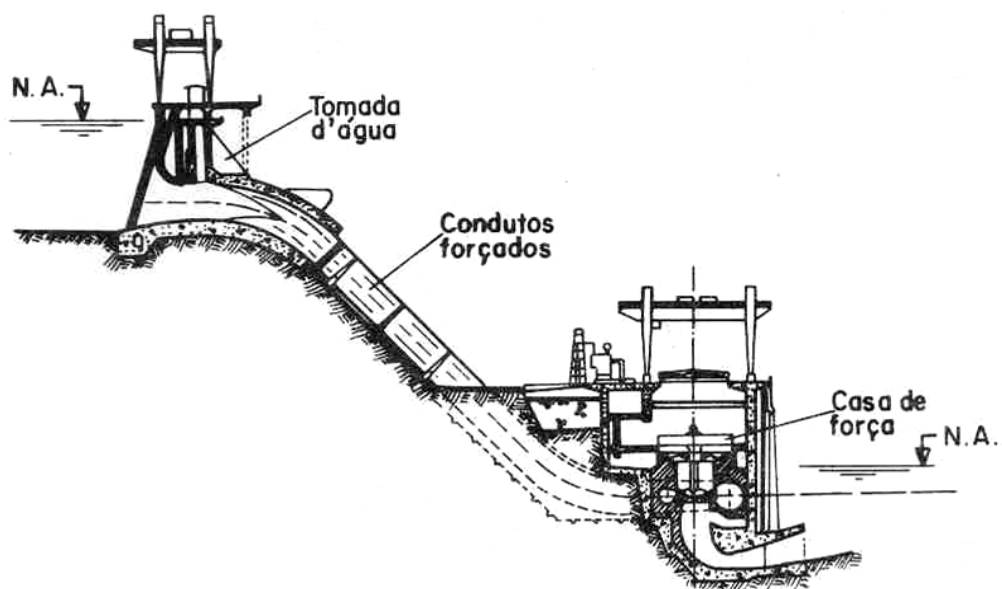


FIGURA 2.2 - Corte Longitudinal do Aproveitamento da UHE Salto Osório (MASON, 1988).

Nos aproveitamentos de baixa ou média queda é muito frequente que a casa de força esteja, de certo modo, associada à barragem. Muitas vezes, as duas estão

integradas num mesmo conjunto, como é o caso da UHE Salto Osório. Esse tipo de usina pode ser chamado de usina compacta.

O elemento hidráulico chaminé de equilíbrio é observado em circuitos de geração do tipo alta queda, conforme FIGURAS 2.3 e 2.4, onde a casa de força se encontra relativamente longe da tomada d'água do reservatório de montante.

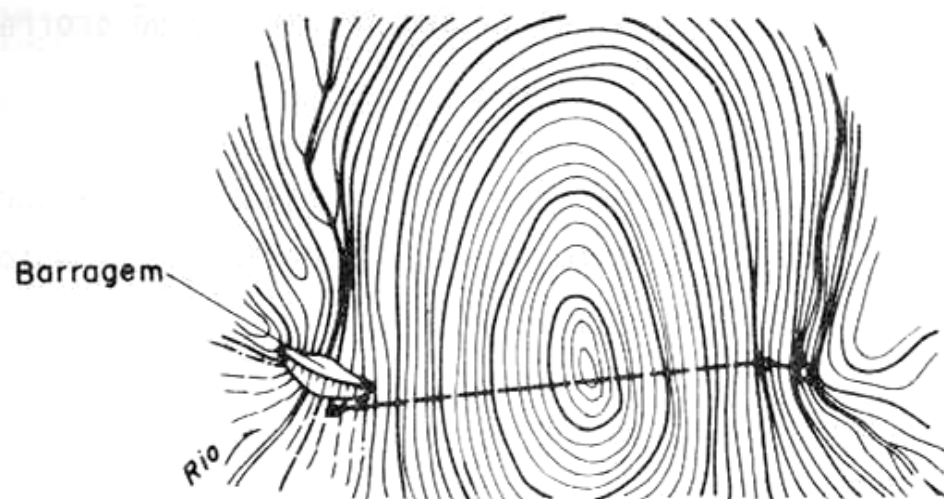


FIGURA 2.3 - Planta Típica de um Aproveitamento de Alta Queda (MASON, 1988).

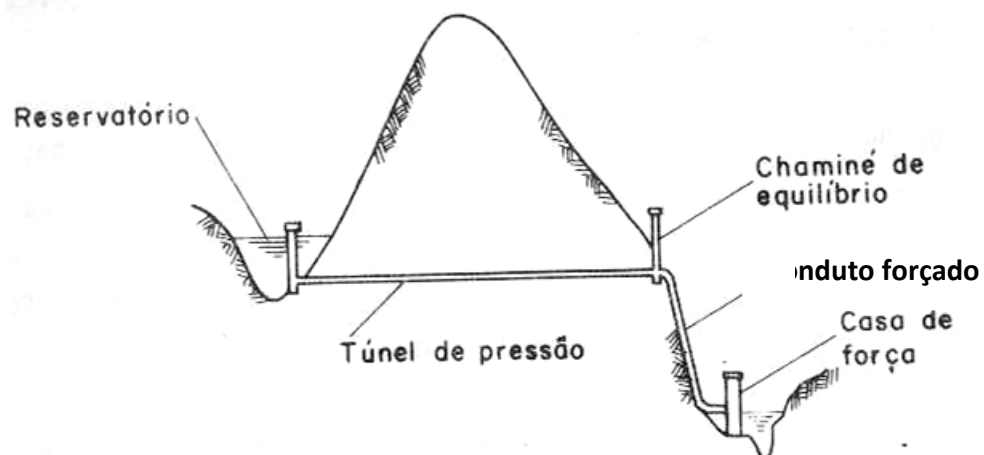


FIGURA 2.4 - Corte Típico de um Aproveitamento de Alta Queda (MASON, 1988).

## 2.4 CIRCUITO HIDRÁULICO TÍPICO DE USINA DE ALTA QUEDA

Este tópico trata dos acessórios básicos dos aproveitamentos hidrelétricos sem mencionar detalhadamente a estrutura da chaminé de equilíbrio, o que será

realizado no item 2.8. Após serem definidos assuntos físicos peculiares ao estudo, será apresentada a revisão bibliográfica referente à chaminé de equilíbrio.

#### 2.4.1 Tomada de Água

É uma estrutura que capta a água do reservatório e encaminha para um túnel ou conduto forçado, o qual por sua vez, encaminha o fluxo d'água à casa de força. O manual “Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas” (ELETROBRÁS, 2000) explica que os arranjos típicos para a disposição das estruturas componentes da tomada d'água serão variados, em função dos aspectos topográficos e geológico-geotécnicos de cada local.

#### 2.4.2 Túneis de Baixa Pressão

Em certos tipos de usinas hidrelétricas, aparecem como componentes importantes os túneis de baixa pressão (operando sob pequena pressão). Os túneis de baixa pressão podem ser revestidos ou não revestidos, seja por motivos de estanqueidade relativa ou por motivos estruturais. Podem ser em concreto projetado, em camada de concreto simples ou camada de concreto armado e ainda combinado com blindagem metálica. A decisão quanto à necessidade de ancorar, blindar um túnel, ou especificar o tipo de revestimento a adotar depende de diversas condições, quanto à capacidade estrutural da rocha, tipo de rocha e seu grau de fissuração ou fendilhamento, quanto ao grau de rugosidade e seu efeito sobre perdas de carga, quanto ao nível de pressões a que se submeterá.

#### 2.4.3 Túneis/Condutos Forçados

Túneis, condutos sob pressão ou condutos forçados, poços de carga e condutos de carga, são aqueles por onde a água escoar sob pressão diferente da pressão atmosférica. Exemplo: condutos forçados por bombeamento ou gravidade.

Os condutos forçados constituem elemento integrante das centrais hidrelétricas, quando o reservatório está separado e distante da casa de força. Os condutos desenvolvem-se geralmente em via descendente, em virtude do desnível que deve existir entre o reservatório de acumulação e a casa de força. Segundo Mason (1988), em UHE's os condutos forçados operam sob pressão entre o reservatório e a casa de força. Podem incluir trechos em túnel e trechos em



condutos de baixa e alta pressão. O conduto é normalmente construído por uma tubulação metálica, embora possam também ser cogitadas soluções de outro tipo.

Do ponto de vista hidráulico, não há diferença conceitual entre o conduto forçado, túnel sob pressão, poço de carga (*shaft*) e o conduto forçado metálico à céu aberto (*penstock*).

No dimensionamento hidráulico dos condutos ou túneis sob pressão não deve se perder de vista os parâmetros básicos: a vazão de projeto e a perda de carga, que devem ser tais a conduzir esta descarga com uma velocidade aceitável e cuja fixação intervém alguns outros critérios.

A velocidade poucas vezes deixa de estar entre os limites de 3 e 5 m/s, determinados pelos efeitos de abrasão das partículas sólidas carregadas pela água, além da perda de carga que é função da velocidade. Velocidades altas condicionam perdas de carga mais elevada e conseqüentemente menor utilização da queda disponível (MASON, 1988).

Mas observa-se, atualmente, projetos hidráulicos de condutos sob pressão que o fluxo chega à ordem de 8 m/s de velocidade. Para a fixação da velocidade contribuem também considerações de ordem técnica de construção e economia, assim fazendo a correlação entre os parâmetros mencionados. No caso da característica de locação, os condutos forçados usualmente estão expostos, mas raramente enterrados. Os condutos expostos têm a vantagem da acessibilidade e facilidade de manutenção, porém, em contrapartida, estão mais expostos às ações térmicas e de intempéries e exigem apoios e fixações dispendiosas. Os condutos enterrados são protegidos contra ações térmicas e contra deslizamentos, além de sofrerem menores tensões em face do apoio contínuo. Por outro lado, têm a desvantagem da inspeção difícil e manutenção complicada, além de exigirem proteção anticorrosiva. Para atender imperativos construtivos diversos, os condutos forçados devem ter juntas rígidas, flexíveis e juntas de expansão.

A seguir apresenta-se um conduto forçado a céu aberto (ou *penstock*) apresentado por Macintyre (1993).

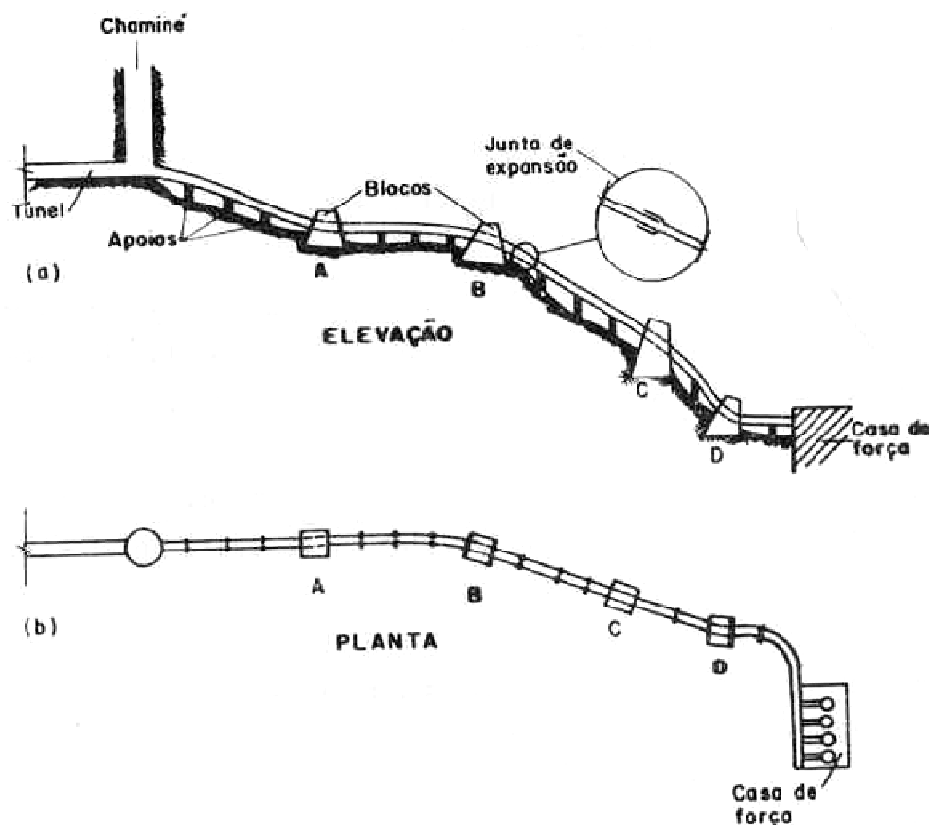


FIGURA 2.5 – Conduto Forçado Típico (externo) de Circuito de Geração (MACINTYRE, 1983).

#### 2.4.4 Casa de Força

Grande parte deste tópico tem como base as bibliografias de Mason (1988) e de Macintyre (1983). As casas de força das usinas hidrelétricas têm por finalidade alojar as turbinas, geradores elétricos e outros equipamentos mecânicos e eletromecânicos, comportando no seu interior, na maioria das circunstâncias, válvulas de proteção hidráulica. O projeto estrutural de uma casa de força é, em suma, o projeto estrutural de uma construção pesada, cujos esforços dependem dos equipamentos e cuja estabilidade, às vezes, depende de ações hidrostáticas somada com pressões hidrodinâmicas. Os esforços hidrodinâmicos fazem referência ao efeito de inércia da unidade turbina e gerador e deverão ser obtidas dos fabricantes.

A disposição e o tipo de das casas de força depende do layout geral dos componentes do aproveitamento. Conforme a bibliografia “Diretrizes para projetos de PCH” (2000) existem apenas dois (2) tipos de casa de força: “exterior e abrigada”.

Cabe registrar que uma casa de força subterrânea não é normalmente compatível com o porte de uma PCH devido, por exemplo, ao seu custo. Grosso modo, pode-se também distinguir as casas de força segundo o tipo de aproveitamento hidrelétrico, em casas de força destinadas a aproveitamentos de baixa queda e aproveitamentos de alta queda. Nos aproveitamentos de alta queda, conforme FIGURA 2.6, a casa de força costuma ser uma construção isolada dos demais componentes do aproveitamento.

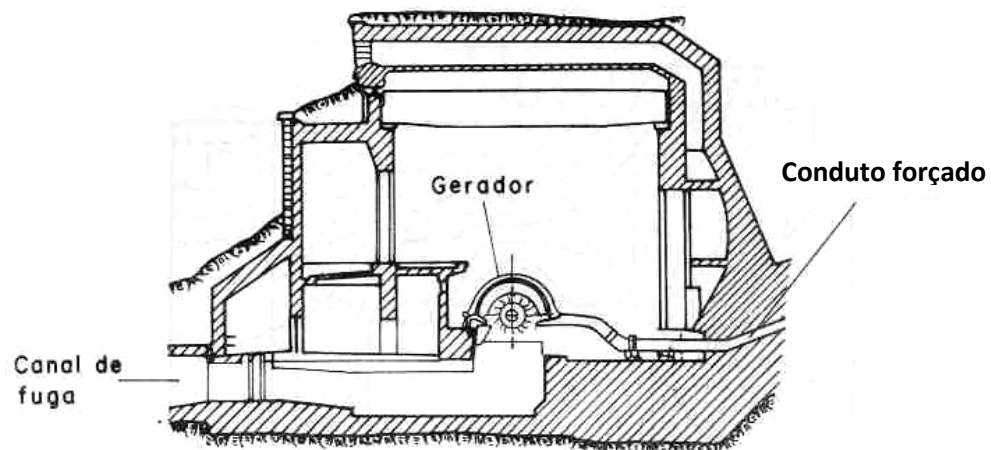


FIGURA 2.6 – Casa de Força Isolada Típica de Aproveitamentos de Alta Queda (MASON, 1988).

#### 2.4.5 Válvulas e Distribuidores

As válvulas são dispositivos destinados a estabelecer, controlar ou interromper o fluxo nos escoamentos. Segundo Macintyre (1983), as válvulas visam o controle direto e “imediatos” da admissão de água às turbinas, permitindo isolá-las para manutenção e reparos.

Para alterar a quantidade de movimento de um fluxo, ou até mesmo a direção é necessária a aplicação de forças convenientes sobre o fluido (STREETER E WYLIE, 1980).

Quando uma pá móvel desvia um jato de fluido, ou bloqueia a área de escoamento existem forças entre estes elementos que realizam trabalho devido ao deslocamento.

Existe uma grande variedade de válvulas, cuja escolha depende não apenas da natureza da operação a realizar em um circuito de geração, mas também da vazão, da pressão, temperatura a que são submetidas às válvulas e da forma de acionamento necessário ou pretendido para operá-las. As principais válvulas empregadas nas usinas hidrelétricas que podem ser instaladas desde a casa de força até a entrada da turbina são válvulas de gaveta, válvulas borboleta, válvulas anulares, esféricas, válvulas de cone e válvulas para dissipação de energia. As válvulas borboleta são amplamente aplicadas e garantem um fechamento rápido do conduto.

A figura 2.7 mostra duas válvulas borboleta: a válvula a esquerda é acionada mecanicamente por um motor e a da direita por um sistema hidráulico.

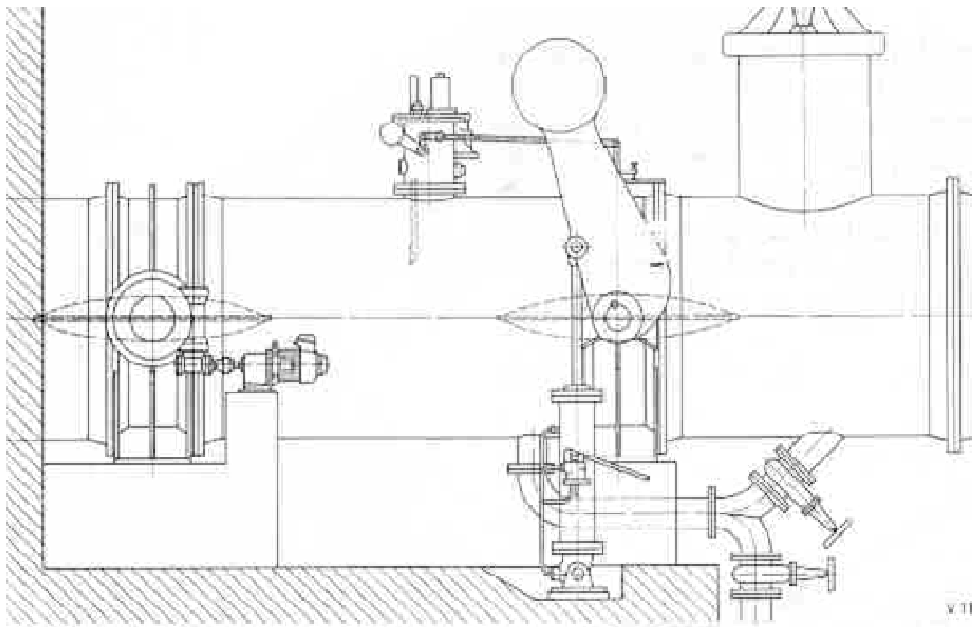


FIGURA 2.7 – Válvulas Borboleta (MASON, 1988).

É comum a instalação de válvulas borboleta logo a montante de turbinas, assim a válvula garante a proteção das cargas hidráulicas nos equipamentos de geração e possibilita a manutenção dos mesmos.

No conjunto gerador/turbina o dispositivo chamado distribuidor tem a função de regular a carga hidráulica e consequentemente alterar o fluxo passante pela turbina. Esse dispositivo, no caso de algum sinistro elétrico do sistema (rejeição total

da máquina, *Black-out*), pode fechar-se totalmente, funcionando semelhantemente a uma válvula.

## 2.5 PCH – PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Pelas Diretrizes para Projetos de PCH da Eletrobrás (2000), define-se que uma usina hidrelétrica é considerada como uma Pequena Central Hidrelétrica quando:

- a) A potência instalada total estiver compreendida entre 1,0 e 30,0 MW;
- b) Área inundada pelo reservatório até 3,0 km<sup>2</sup>, para cheia centenária.

Os pequenos aproveitamentos hidráulicos no Brasil estão sendo muito utilizados atualmente. A lei no 9.648, de 27/05/98, autoriza a dispensa de licitações para empreendimentos hidrelétricos até 30 MW de potência instalada para Auto Produtor e Produtor Independente, tornando atrativa a exploração deste tipo de usina. Os órgãos ambientais estão definindo licenças de construção com mais facilidade e prioridades para estas pequenas usinas quando se trata de empreendimentos não tão agressivos sócio/ambientalmente.

Das pequenas centrais hidrelétricas à biomassa de cana-de-açúcar, o Brasil tem alternativas sustentáveis para fazer frente à demanda de energia (CARDOSO, 2008).

As pequenas usinas estão sendo instaladas para atender a população rural, indústrias e pólos industriais pequenos. Existem indústrias grandes afastadas dos centros urbanos que aproveitam os rios próximos para atender exclusivamente sua demanda por energia. Consequentemente, as PCHs podem ser ligadas a grandes sistemas de distribuição, mas para fazer frente aos grandes empreendimentos é necessária a instalação de inúmeras delas.

O único manual de projeto de PCHs oficial foi publicado pela Eletrobrás e pode ser considerado para a definição de um estudo completo de um respectivo projeto básico. No decorrer desta pesquisa, um capítulo contemplará estas diretrizes para a definição dos limites das ondas de oscilações da massa, e serão resolvidas segundo o protótipo laboratorial analisado.

A FIGURA 2.8 mostra uma foto geral da PCH Caveiras, que aproveita o potencial da cabeceira do rio de mesmo nome. Ela apresenta duas chaminés de equilíbrio a céu aberto.



FIGURA 2.8 – Chaminés de Equilíbrio da PCH Caveiras (ELETROBRÁS, 2000).

## 2.6 ESCOAMENTO EM CONDUTOS FORÇADOS

No caso da análise das equações que regem o escoamento não-permanente de fluidos em condutos forçados são observadas as aplicações das equações da Conservação da Quantidade de Movimento e da Continuidade (ou conservação da massa).

Este item fundamenta-se basicamente no livro de Streeter e Wylie (1982). Para total entendimento, partem-se de conceitos básicos convergindo para as formulações de derivadas parciais a serem resolvidas pelos métodos de cálculo de diferenças finitas.

### 2.6.1 Escoamento Permanente em Conduto Forçado Simples

Tratando-se de fluidos incompressíveis em condutos forçados e em regime permanente o escoamento segue a teoria do seguinte balanço de forças conforme o conceito da fórmula de Colebrook. A FIGURA 2.9 apresenta tais forças em um tubo horizontal.

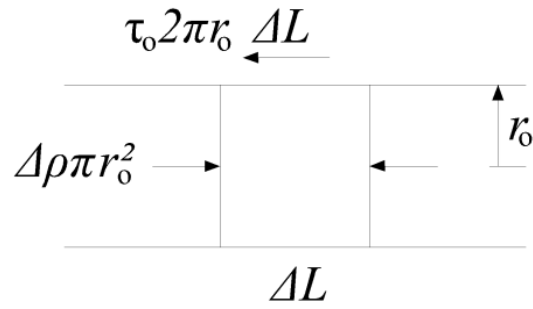


FIGURA 2.9 – Condições de Equilíbrio para Escoamento Permanente num Tubo (STREETER e WYLIE, 1982).

$$\tau_0 = \frac{\Delta p}{\Delta L} \frac{r_0}{2} \quad (2.1)$$

Onde,

$\tau_0$  = tensão tangencial, em Pa;

$p$  = pressão, em Pa;

$r_0$  = raio do tubo, em m;

$L$  = comprimento, em m,

que é válida para regime laminar ou turbulento. A equação de Darcy-Weisbach é descrita por:

$$\Delta p = y \cdot h_f = f \frac{\Delta L}{2 \cdot r_0} \cdot \rho \frac{v^2}{2} \quad (2.2)$$

Onde,

$y$  = comprimento total do conduto, em m;

$h_f$  = perda de carga unitária, m/m;

$f$  = fator de resistência;

$\rho$  = massa específica da água, kg/m³.

$v$  = velocidade média, em m/s.

Efetuada os cálculos chega-se à formulação:

$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot v \quad (2.3)$$

A equação (2.3) relaciona os termos do cisalhamento na parede, coeficiente de atrito, e a velocidade média. A combinação de equilíbrio para o escoamento permanente num tubo pode ser representada conforme a FIGURA 2.9.

No caso de escoamentos de fluidos incompressíveis em regime permanente num tubo, as irreversibilidades são expressas em termos de perdas de carga, ou queda da linha piezométrica. Basicamente a linha piezométrica está descrita em  $\frac{p}{\gamma}$  acima da linha do centro do tubo, e se  $z$  é a elevação do centro do tubo, então  $z + \frac{p}{\gamma}$  é a elevação de um ponto da linha piezométrica. Novamente a equação, desta vez transformada, de Darcy-Weisbach,

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad (2.4)$$

Onde,

$D$  = diâmetro hidráulico do conduto, em m;

$g$  = aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>.

### 2.6.2 Escoamento Não-Permanente em Condutos Forçados

A análise dos escoamentos não-permanentes é mais complexa que a análise simples de um estado permanente.

No escoamento transitório uma outra variável independente intervém, o tempo, e as equações passam a ser representadas por equações parciais, em vez de equações diferenciais ordinárias (STREETER e WYLIE, 1982).

Nos casos práticos de oscilação de massa em sistemas de condutos, a resistência que ocorre é turbulenta. Em túneis e grandes condutos o número de



Reynolds é elevado, pois sempre são observadas relativamente grandes velocidades, mas pode ser nulas e negativas (de retorno). A hipótese de adotar um único coeficiente de resistência ao movimento referente ao atrito das paredes, viscosidade do fluido e proporcional ao quadrado da velocidade média aproxima-se das condições reais. Portanto, é adotado sendo que a resistência em um regime não-permanente seria idêntica ao problema de regime permanente desenvolvido.

As equações que regem o escoamento não-permanente ou transitório seguem o princípio do equilíbrio de forças de um volume de controle aplicado para o tubo em questão.

Conceito do Volume de Controle: trata-se de uma região do espaço útil para a análise de fenômenos de escoamento. A fronteira do volume de controle denomina-se superfície de controle. O conceito de volume de controle é utilizado para deduzir as equações da Continuidade, Quantidade de Movimento, da Energia e demais equações. Para um volume de controle genérico pode-se afirmar sempre: seja  $N$  o valor de alguma grandeza associada ao sistema no instante  $t$  (pode ser relacionado a massa, energia, quantidade de movimento) e  $\eta$  o valor desta grandeza por unidade de massa, através do fluido.

Desenvolve-se a fórmula em termos de volume de controle, obtém-se (STREETER e WYLIE, 1982):

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \eta \rho \cdot dv + \int_{sc} \eta \rho \cdot \vec{v} \cdot dA = 0 \quad (2.5)$$

Onde,

$v$  = volume (do volume de controle);

$\vec{v}$  = vetor velocidade;

$A$  = área interna do conduto.

#### a) Equação da Conservação da Quantidade de Movimento

A segunda lei de Newton para um sistema é utilizada na determinação da quantidade de movimento para um volume de controle. Seja  $N$  a Quantidade de

Movimento  $(m \cdot \vec{v})$  do sistema e  $\eta$  a quantidade de movimento por unidade de massa  $(\rho / \vec{V} \rho)$  então,

$$\Sigma F = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho \vec{v} dV + \int_{sc} (\rho \vec{v}) \vec{v} \cdot dA \quad (2.6)$$

A seguir é deduzida a equação de Euler para uma linha de corrente em um caso geral de um pequeno elemento cilíndrico, para após transformá-la na forma da equação da Conservação da Quantidade de Movimento.

Pode-se deduzir a equação de Euler por duas maneiras, aqui está sendo considerada a utilização de um volume de controle, mostrado a FIGURA 2.10, para um pequeno elemento prismático cilíndrico com eixo coincidente em uma linha de corrente.

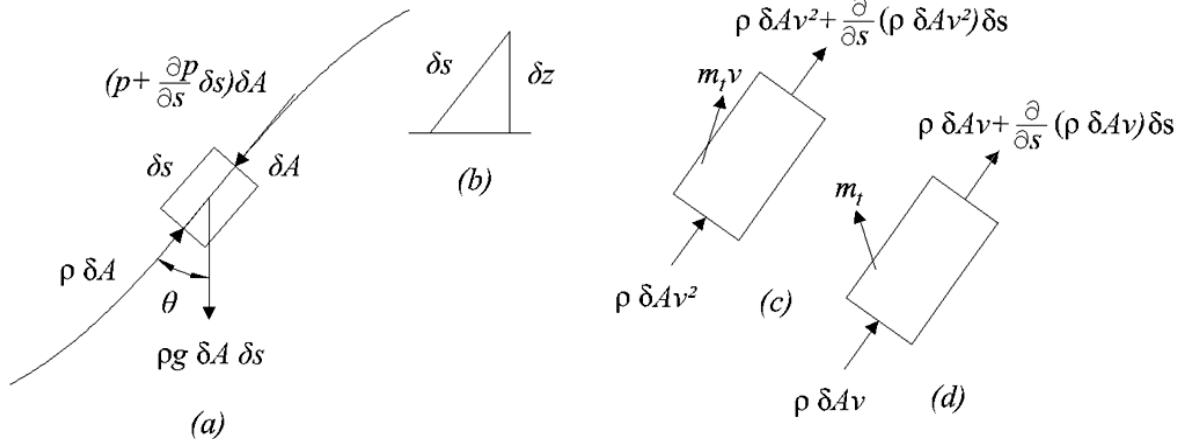


FIGURA 2.10 – Aplicação da Conservação da Quantidade de Movimento para um Escoamento na Direção  $s$  Através de um Volume de Controle, (STREETER e WYLIE, 1982).

A área da seção transversal do volume de controle é  $\delta A$  e cujo comprimento é  $\delta s$ . A velocidade é tangencial à linha de corrente  $s$ . Adotando um escoamento sem atrito, as forças que agem no volume de controle na direção  $s$  são: as de pressão e o peso. Aqui a velocidade do fluido é descrita como  $v$ . Aplica-se a equação (2.6) para o volume de controle, FIGURA 2.10, obtém-se:

$$\sum F_s = \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) \cdot \delta s \cdot \delta A + \sum_{sc} \rho \vec{v} \cdot dA \quad (2.7)$$

$\partial s$  e  $\partial A$  não são funções do tempo. Desenvolve-se:

$$\sum F_s = p \delta A - \left( p \partial A + \frac{\partial p}{\partial s} \cdot \delta s \cdot \delta A \right) - \rho g \delta s \delta A \cdot \cos \phi \quad (2.8)$$

$$\sum F_s = -\frac{\partial p}{\partial s} \cdot \delta s \cdot \delta A - \rho g \frac{\partial z}{\partial s} \delta s \delta A \quad (2.9)$$

E com o resultado de  $\sum_{sc} \rho \vec{v} \cdot dA$ :

$$\sum_{sc} \rho \vec{v} \cdot dA = \left( \rho v \frac{\partial v}{\partial s} - v \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \delta A \delta s \quad (2.10)$$

Substitui-se as equações (2.9) e (2.10) na (2.7),

$$\left( \frac{\partial p}{\partial s} + \rho g \frac{\partial z}{\partial s} + \rho v \frac{\partial v}{\partial s} + \rho \frac{\partial v}{\partial t} \right) \delta A \delta s = 0 \quad (2.11)$$

Após dividir por  $\rho \delta A \delta s$  e tomar o limite de  $\delta A$  e  $\delta s$  tendendo a zero, para o caso sem atrito, a equação de Euler pode ser aplicada para movimentos não permanentes, resultando na conservação da quantidade de movimento da seguinte forma:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (2.12)$$

Quando ocorre uma oposição de uma tensão de cisalhamento  $\tau_0$  ao movimento da coluna líquida, ela pode ser incluída na equação de Euler para o

movimento ao longo de uma linha de corrente. A seguir muda-se o eixo do conduto de  $s$  para  $x$ .

A resistência no comprimento é  $\tau_0 \pi D \delta x$  e a massa da partícula em análise é  $\rho A \delta x$ , e dividindo as equações obtém-se:  $4\tau_0/\rho D$ . E a equação (2.12) para o movimento com resistência laminar (STREETER e WYLIE, 1982):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0 \quad (2.13)$$

A equação acima é admitida tanto para resistência laminar quanto para resistência turbulenta.

Efetua-se a substituição de  $\tau_0$  dado pela equação (2.3) na equação (2.13),

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + f \frac{v^2}{2D} = 0 \quad (2.14)$$

Wylie e Streeter (1978) apresentaram, também, a equação não conservativa do escoamento não-permanente unidimensional em condutos considerando a vazão ao invés da velocidade, da forma:

$$g \cdot A \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + f \frac{Q|Q|}{2D \cdot A} = 0 \quad (2.15)$$

Onde,

$H =$  cota piezométrica;

O primeiro termo é referente à força de pressão, o segundo é referente ao movimento convectivo, o terceiro à aceleração local, e o último à perda de carga.

b) Equação da Continuidade.

A equação da Continuidade parte do princípio geral da conservação da massa, ou seja, que a massa de um sistema não se perde com o tempo:

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (2.16)$$

Se no caso da equação do volume de controle genérico (2.5)  $N$  for a massa do sistema,  $\eta$  será a massa por unidade de massa, ou seja  $\eta = 1$ .

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \rho dv + \int_{sc} \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} \quad (2.17)$$

A equação da continuidade para o regime não-permanente (2.17) é aplicada para o volume de controle da FIGURA 2.11 abaixo. Onde  $S.C.$  é superfície de controle.

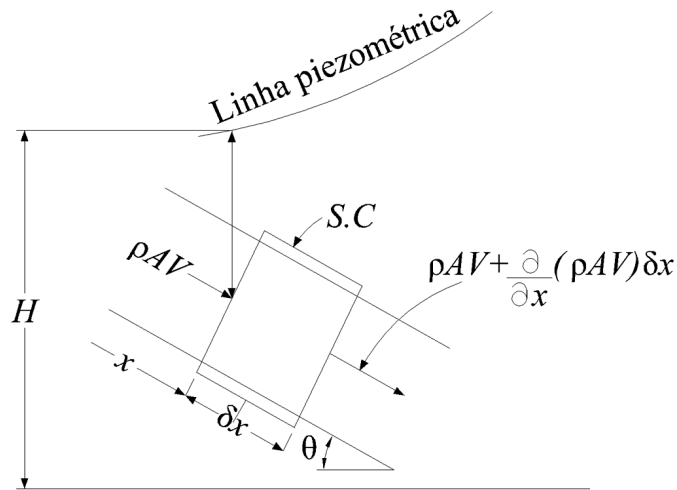


FIGURA 2.11 – Diagrama do Sistema para a Dedução da Equação da Continuidade, (STREETER e WYLIE, 1982).

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho AV) \delta x = \frac{\partial}{\partial t}(\rho A \delta x) \quad (2.18)$$

Onde,

$V$  = velocidade instantânea.

O comprimento do volume de controle  $\delta x$  não é função de  $t$ . Dividindo tudo por  $\rho A \delta x$ , e após o desenvolvimento a equação fica:

$$\frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{V}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.19)$$

Os dois primeiros termos são a derivada total de  $(1/A)dA/dt$  e os dois seguintes a derivada total  $(1/\rho)d\rho/dt$ . O resultado fica:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.20)$$

O primeiro termo refere-se à elasticidade da parede do tubo e à sua taxa de deformação com a pressão. O segundo leva em conta a compressibilidade do líquido.

Analisando apenas estes dois termos de forma mais completa:

- Quanto à elasticidade da parede do tubo: a velocidade de alteração da força de tração por unidade de comprimento é  $\frac{D}{2} \frac{dp}{dt}$  que quando dividido pela espessura  $t'$ , fornece a velocidade de alteração da tensão e se dividido também pelo módulo da elasticidade  $E$  do material da parede, obtém-se a velocidade de “alongamento”:  $\frac{D}{2} \frac{dp}{dt} \frac{1}{t' E}$ . Multiplica-se a velocidade de alongamento pelo raio e pela área resultando na expressão:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{dp}{dt} \frac{D}{t' E} \quad (2.21)$$

Quanto à compressibilidade de um líquido (ver item 2.6.3): é expressa pelo módulo de elasticidade volumétrica,  $k$ :

$$k = \frac{dp}{d\vartheta} \quad (2.22)$$

Para o volume do líquido  $\vartheta$  obtém-se:

$$k = \frac{dp}{\frac{d\vartheta}{\vartheta}} \quad (2.23)$$

Como  $\frac{d\vartheta}{\vartheta}$  é adimensional,  $k$  é expresso em unidade de pressão. Para definir a massa específica de um ponto, faz-se:

$$\rho = \lim_{\Delta\vartheta \rightarrow \varepsilon^3} \frac{\Delta m}{\Delta\vartheta} \quad (2.24)$$

Onde  $\Delta m$  é a massa de fluido em um pequeno volume  $\Delta\vartheta$ , e  $\varepsilon$  é uma distância muito pequena comparada com a distância média entre moléculas.

É conveniente então relacionar as equações acima (2.23 e 2.24) conforme a maneira a seguir:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{k} \frac{dp}{dt} \quad (2.25)$$

Com a equação (2.21) e a equação (2.25), transforma-se a equação (2.20) em:

$$\frac{1}{k} \frac{dp}{dt} \left( 1 + \frac{kD}{tE} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.26)$$

Segundo Streeter e Wylie (1982) celeridade ou velocidade do som no meio ao quadrado (ver item 2.6.3 e 2.6.4) pode ser definido pela relação:

$$a^2 = \frac{k / \rho}{1 + (k + \varepsilon)(D / t')c_1} \quad (2.27)$$

Na qual  $c_1$  é a unidade para condutos com juntas de dilatação. A equação (2.26) torna-se:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.28)$$

E a derivada  $\frac{d\rho}{dt}$  é:

$$\frac{d\rho}{dt} = V \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = V \rho g \left( \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \rho g \left( \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \right) \quad (2.29)$$

A variação  $\rho$  em relação ao  $x$  e ao  $t$  é muito menor que a variação de  $H$  com o  $x$  e o  $t$ , por isso  $\rho$  foi considerado constante na equação (2.29). Se o conduto estiver em repouso  $\frac{\partial z}{\partial t} = 0$  e  $\frac{\partial z}{\partial x} = -\text{sen}\theta$ , transforma-se a equação (2.29) em:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = V g \left( \frac{\partial H}{\partial x} + \text{sen}\theta \right) + g \left( \frac{\partial H}{\partial t} \right) \quad (2.30)$$

Substitui-se a equação (2.30) na equação (2.28) e encontra-se a equação da continuidade da forma:

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + V \text{sen}(\theta) = 0 \quad (2.31)$$



Admite-se que a área do conduto seja independente de  $x$  e  $t$  e inclinando com a horizontal em um ângulo de  $\alpha$ , a equação pode ser descrita em função da vazão, como:

$$\frac{Q}{A} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{Q}{A} \sin(\alpha) + \frac{a^2}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.32)$$

As equações (2.15) e (2.32) formam um sistema de duas equações diferenciais parciais (em  $x$  e  $t$ ) das variáveis vazão e cota piezométrica do sistema.

### 2.6.3 Escoamento de Fluido Compressível

Considerando situações referentes ao escoamento de um fluido compressível aparece uma nova variável: a massa específica; e dispõe-se de outra equação, a de estado, que relaciona pressão, massa específica e temperatura.

Em geral analisam-se os seguintes tópicos em relação à um “gás perfeito”: velocidade de propagação do som, número de Mach, escoamento isoentrópico, ondas de choque, que são julgados mais importantes para este trabalho, sendo que podemos analisar ainda as linhas de Fanno e Rayleigh, o escoamento adiabático, o escoamento com troca de calor, o escoamento isotérmico e a analogia entre ondas de choque no gás e as ondas num canal.

#### a) Velocidade de Propagação do Som e Número de Mach

A velocidade de propagação de uma perturbação num conduto pode ser determinada aplicando-se as equações da Conservação da Quantidade de Movimento e da Continuidade.

A equação da continuidade pode ser descrita considerando o elemento de controle apresentado na FIGURA 2.12.

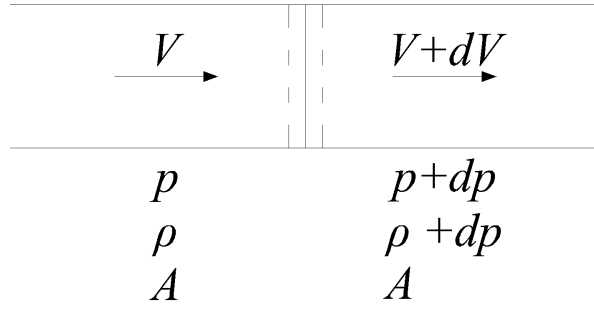


FIGURA 2.12 – Escoamento em Regime Permanente num Conduto Prismático com uma Pequena Variação na Velocidade, Pressão e Massa Específica Através da Seção Indicada (STREETER, 1980).

$$\rho.V.A = (\rho + d\rho).(V + dV).A \quad (2.33)$$

Onde,

$A$  = a área da seção transversal do conduto;

$V$  = velocidade instantânea da água.

Simplificando esta equação, obtém-se:

$$\rho.dV + V.d\rho = 0 \quad (2.34)$$

Aplica-se a equação da conservação da quantidade de movimento ao volume de controle delimitado pelas linhas tracejadas:

$$p.A - (p + dp).A = \rho.V.A.(V + dV - V) \quad (2.35)$$

$$dp = -\rho.V.dV \quad (2.36)$$

Se  $\rho.dV$  for eliminado das equações (2.35) e (2.36),

$$V^2 = \frac{dp}{d\rho} \quad (2.37)$$

Uma variação nas condições de um escoamento em regime permanente somente pode ocorrer quando a velocidade no conduto assumir o valor particular

$$V = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}.$$

Esta velocidade é chamada de velocidade de propagação do som no meio considerado, no caso, a água.

Assim sendo, a equação da velocidade do som pode ser descrita da seguinte forma:

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (2.38)$$

Pode ser posta sob várias formas úteis e se aplica tanto a líquidos como gases.

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \text{ onde, o módulo de elasticidade volumétrica é } k = \frac{\rho \cdot dp}{d\rho}.$$

No escoamento isotérmico, a velocidade do som permanece constante, mostrando que a velocidade num gás perfeito é função somente da sua temperatura.

$$p = \rho RT, \text{ portanto, } a = \sqrt{kRT} \quad (2.39)$$

O número de Mach é definido como a relação entre a velocidade do fluido e a velocidade local de propagação do som no meio,

$$Ma = \frac{V}{a} \quad (2.40)$$

O número de Mach é uma medida da importância da compressibilidade. Num fluido realmente incompressível,  $k$  é infinito e  $Ma = 0$ .

#### 2.6.4 Golpe de Aríete

Quando uma válvula próxima à unidade geradora ou o próprio distribuidor da turbina se fecha rapidamente a vazão daquela seção é gradativamente reduzida até zero. Com isto, o fluido mais próximo à válvula é freado e comprimido. Esta carga no lado de montante da válvula aumenta devido à inércia da massa de água em movimento e provoca uma flutuação de alta pressão, com a parede do conduto se distendendo. Inicia-se o golpe de aríete.

A flutuação brusca de pressão, conhecida como golpe de aríete, se explica devido à elasticidade da água, ou seja, a capacidade em comprimir-se, compressibilidade.

De modo sucinto, tão logo a primeira camada da água é desacelerada devido à um fechamento rápido de uma válvula a jusante, é comprimida o processo se repete com a camada adjacente, e assim sucessivamente, propagando-se para montante em toda a extensão do conduto até encontrar o reservatório sem diminuição da velocidade (STREETER e WYLIE, 1982).

Uma vez encontrado o reservatório de montante, a onda do golpe de aríete reflete de volta para a válvula. Isto ocorre por causa da inércia do reservatório ser muito maior em relação à massa do escoamento no tubo, ocorrendo uma situação de desequilíbrio refletindo-a segundo a lei da ação e reação.

Essa flutuação de pressão, que ocorre primeiramente contra o fluxo, atua de modo a reduzir a velocidade do escoamento. A jusante da válvula ocorre o mesmo fenômeno de reflexo, mas a onda que se cria é de baixa pressão, permitindo que a parede do conduto se contraia. Se estas pressões negativas de jusante forem menores que a pressão de vapor, o líquido se vaporizará parcialmente, ocorrendo o fenômeno chamado de quebra de coluna de água.

A FIGURA 2.13 demonstra a sequência de eventos após um repentino fechamento de uma válvula, desprezando-se o atrito.

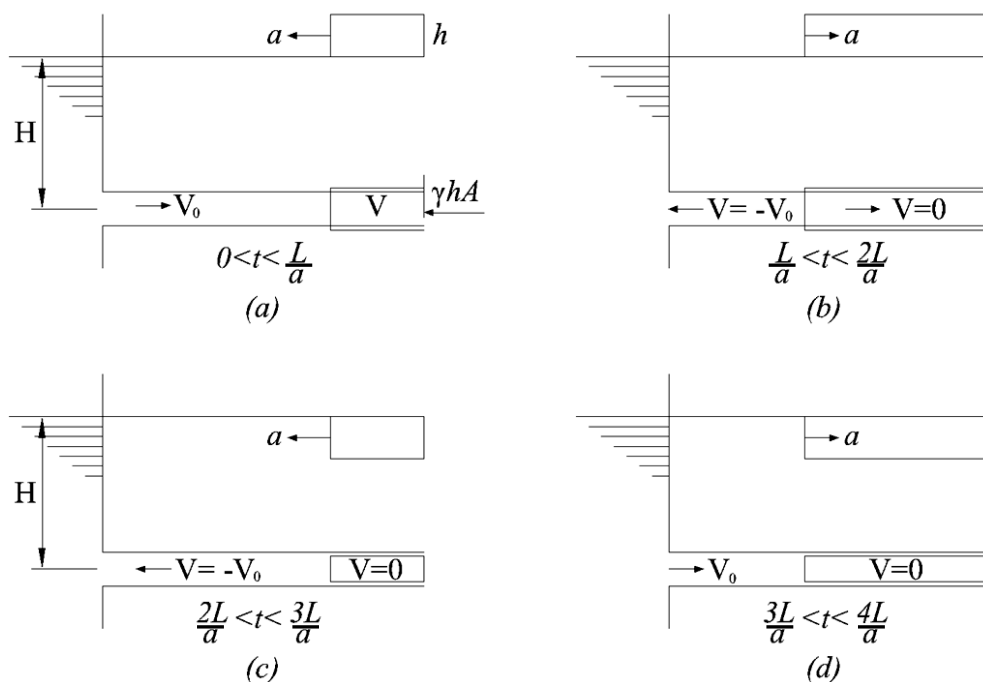


FIGURA 2.13 – Seqüência de Eventos de um Ciclo após um Repentino Fechamento para um escoamento sem atrito (STREETER e WYLIE, 1982).

No instante do fechamento ( $t = 0$ ) o fluido mais próximo da válvula é freado e comprimido, e a parede do conduto se distende ( $a$ ). Tão logo a primeira camada é comprimida o processo repete-se com a camada adjacente. O fluido a montante da válvula continua movendo-se para jusante sem diminuição de velocidade, até que as camadas sucessivas tenham sido comprimidas em toda a extensão do conduto. A alta pressão move-se para montante como uma onda, freando o fluido à sua passagem, comprimindo-o e expandindo o conduto. Quando a onda atinge o início do conduto ( $t = L / a$  \_segundos), todo o fluido encontra-se sob a carga extra  $h$ , toda a quantidade de movimento foi eliminada e toda a energia cinética transformou-se em energia elástica (STREETER e WYLIE, 1982).

Ocorre uma condição de desequilíbrio na extremidade do conduto com o reservatório, no instante de chegada da onda de pressão, já que a pressão no reservatório não se altera. O fluido começa a escoar de volta, principiando pela extremidade junto ao reservatório. Esse escoamento alivia a pressão até o valor normal reinante antes do fechamento, a parede do conduto volta ao seu normal e o fluido assume velocidade  $V_0$  dirigida para o sentido contrário. Este processo propaga-se para jusante, em direção à válvula, à velocidade do som no conduto  $a$ .

No instante  $2L/a$  em que a onda chega à válvula, as pressões voltaram ao normal em todo o conduto, e a velocidade em todos os pontos é  $V_0$  no sentido montante (STREETER e WYLIE, 1982).

Estando a válvula fechada, não há fluido disponível para manter o escoamento na seção da válvula, e uma baixa pressão se desenvolve ( $-h$ ) de tal modo a parar o fluido. Essa onda de baixa pressão avança para montante à velocidade  $a$  paralisa o fluido, ocasiona a sua expansão em virtude da pressão mais baixa e permite que a parede do conduto se contraia. (Se a pressão estática no conduto não for suficiente para conservar a carga,  $-h$ , acima da pressão de vapor, o líquido se vaporizará parcialmente e continuará a mover-se para trás durante um período de tempo mais longo) (STREETER e WYLIE, 1982).

No instante em que a onda de pressão negativa chega na extremidade de montante do conduto,  $3L/a$  segundos após o fechamento, o fluido está em repouso mas uniformemente à carga  $-h$ , menor que a de antes do fechamento. Isso deixa uma condição de desequilíbrio no reservatório, e o fluido move-se para o conduto, adquirindo a velocidade  $V_0$  para jusante e desenvolvendo ao conduto e ao fluido as condições normais enquanto a onda avança para jusante com a velocidade  $a$ . No momento em que essa onda atinge a válvula, as condições são exatamente as mesmas que prevaleciam no instante do fechamento,  $4L/a$  segundos antes. Esse processo é então repetido a cada  $4L/a$  segundos (STREETER e WYLIE, 1982).

A ação do atrito do fluido e da elasticidade imperfeita do fluido e da parede do conduto, desprezadas até aqui, atuam no sentido de amortecer a vibração e finalmente trazer o fluido a um repouso permanente. O fechamento de uma válvula em tempo menor que  $2L/a$  é chamado de *fechamento rápido*. *Fechamento lento* refere-se a tempo de fechamento maior que  $2L/a$  (STREETER e WYLIE, 1982).

A velocidade de propagação do golpe de aríete é relacionada à velocidade de propagação do som na água e denomina-se celeridade da onda de choque.

Macintyre (1983) apresenta a expressão prática para o cálculo da celeridade, isto é, a formula de Alliévi que define a velocidade de propagação da onda de choque do golpe de aríete expressa em metros por segundo.

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k' \cdot \frac{D}{e}}} \quad (2.41)$$

Onde,

$D$  = diâmetro da seção transversal do conduto, em m;

$e$  = espessura da parede do conduto, m;

$k$  = fator numérico igual a  $10^{10} / E$ .  $E$  = módulo de elasticidade do material.

E  $k'$  vem a ser igual a: 0,5 para aço; 1,0 para ferro fundido; 5,0 para concreto; 4,4 para cimento amianto; 18,0 para tubo de PVC rígido (MACINTYRE, 1983).

No caso de tubulações indeformáveis, o módulo de Young é  $E = \text{infinito}$ , resultando em uma celeridade de 1.425 m/s que é a velocidade máxima de propagação do som na água.

A deformidade das tubulações segundo o golpe de aríete é caracterizada pelo termo  $k' \frac{D}{e}$ . Na grande maioria dos casos de usinas hidrelétricas a celeridade é de aproximadamente 1.000 m/s a 1.300 m/s.

Segundo Chaudry (1987), o golpe de aríete muitas vezes faz analogia ou mesmo é o sinônimo de um escoamento ou regime rapidamente variado. Durante este regime pode ocorrer o surgimento de cargas extremas bastante prejudiciais para as estruturas hidráulicas.

A determinação dos valores de carga ao longo do tempo e do espaço permite o traçado das envoltórias de cargas máximas e mínimas, necessárias para o dimensionamento de estruturas hidráulicas e/ou que visem o amortecimento do fenômeno de modo a evitar danos no circuito de geração. Segundo Amaral e Palmier (2006), isto ocorre devido à energia de pressão resultante do golpe de aríete que se converte em trabalho de deformações da parede dos encanamentos, peças, registros, órgãos de máquinas e demais locais em que a onda de sobre pressão se propaga.

Duas equações diferenciais são consideradas para o tratamento do fenômeno do golpe de aríete em condutos sob pressão. Uma trata da equação da

segunda lei do movimento de Newton e a outra da equação da Continuidade. As variáveis independentes são a distância ao longo do conduto, e o tempo (WYLIE e STREETER, 1978).

Um recurso comum de amortecimento do golpe de aríete bastante aplicado em usinas hidrelétricas de alta queda é a implantação de chaminés de equilíbrio nos condutos forçados (ELETROBRÁS, 2000).

## 2.7 ESTUDOS DOS TRANSIENTES

Existe um grande interesse por parte dos pesquisadores em definir as perdas hidráulicas na ocorrência do fenômeno transiente. Até a metade do século XX, a maioria dos métodos de cálculo existentes não realizava um tratamento específico para o fator de atrito durante o escoamento transitório, utilizando dessa forma, a formulação do escoamento permanente. Entretanto, começava-se a perceber discrepâncias entre os valores calculados pelo método das características tradicional e os valores medidos em experiências realizadas. Dessa forma, vários autores iniciaram uma busca por uma modelação mais apropriada para o escoamento transitório por meio de uma análise mais aprofundada da perda de carga durante o fenômeno (AMARAL e PALMIER, 2006).

Inicialmente os primeiros trabalhos enfocaram o escoamento em regime laminar, como o trabalho apresentado por Zielke em 1968, e a partir da década de 1980 começaram estudos voltados para o regime turbulento (AMARAL e PALMIER, 2006).

Em tal contexto, antes do advento do cálculo das perdas de cargas dos transientes em condutos, e até mesmo negligenciando as perdas de carga, as equações diferenciais que governam estes fenômenos poderiam ser resolvidas simplesmente através de métodos gráficos (BERGANT et alli, 2001). E nada impede o cálculo gráfico com perdas variáveis, definindo a perda de carga como  $h_p = KQ^2$  com  $K$  em função da vazão e  $\Delta t$  pequeno.

O pressuposto fundamental feito por quase todos os modelos de fenômenos transitórios é a de que o fluxo é essencialmente analisado como um tubo unidimensional. E presume-se que a principal característica do fluxo não-



permanente pode ser representada pelas variações da vazão média, tanto no tempo como ao longo da linha central do tubo. As perdas eram governadas basicamente pela fricção, mudanças dinâmicas e dimensões dos dispositivos. Embora esta abordagem direta seja altamente recomendada pela simplicidade dos cálculos dos modelos numéricos, é importante lembrar que os modelos mais complexos são possíveis e, na verdade, foram tentados, sobretudo para os transientes (BRUNONE et alli, 2000).

Muitos modelos têm tentado resolver as mudanças no perfil de velocidades na ocorrência do transiente. Por exemplo, Vardy e Hwang (1991) produziram um modelo “quase-2D” através da combinação entre os perfis de fluxos baseados nas camadas limites teóricas. Silva-Araya e Chaudhry (1997) avaliaram numericamente as velocidades instantâneas em diferentes perfis para determinar a taxa de dissipação de energia dos escoamentos não-permanente para permanente (AMARAL et alli, 2006).

Todos estes estudos vêm demonstrando uma melhor precisão obtida no amortecimento do escoamento transitório por meio de métodos que fazem um tratamento específico para a perda de carga durante a ocorrência do fenômeno.

Trabalhos recentes vêm comparando os resultados do método das características tradicional com outros métodos de cálculo que fazem tratamento específico para o fator de atrito em condições transitórias ver por exemplo AMARAL et alli, 2006).

Os métodos de cálculos que consideram o tratamento específico para o fator de atrito foram comparados com valores medidos em experimentos e apresentaram um amortecimento maior nos casos estudados.

Mas, sabe-se que as condições consideradas por Allievi no começo do século XX para a resolução dos problemas de escoamentos variáveis e de golpe de aríete em adutoras de usinas foram primordiais para a época e ainda são utilizados até hoje.

## 2.8 CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

Uma chaminé de equilíbrio, em princípio, é uma coluna vertical ligada “hidraulicamente” ao conduto forçado de uma usina ou a sistemas hidráulicos de pressão (MIRANDA, 2000).

Muitos autores definiram a função da chaminé de equilíbrio de diferentes formas mas, fundamentalmente, a utilização desta está ligada ao problema da amortecimento do golpe de aríete e reserva de água, com pouca inércia, para acelerar o escoamento para o arranque das turbinas no momento da retomada de carga.

Segundo o *American Society of Civil Engineers* (1989), a função hidráulica essencial da chaminé de equilíbrio é diminuir o comprimento contínuo do conduto sob-pressão. Ela interrompe as ondas de pressão (golpe de aríete) que partem da turbina ou de outras estruturas de controle. A chaminé promove em seu interior a regularização e permite variações de carga.

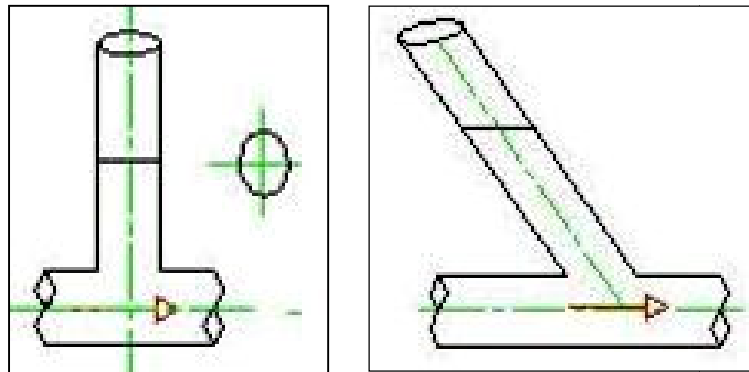
Assim, as chaminés de equilíbrio reduzem as amplitudes das oscilações de pressão no conduto forçado por meio de reflexões de ondas de massa no seu interior pela entrada e saída de água.

Esta deve ser a função básica da chaminé criando uma espécie de barreira contra esta onda que, por sua vez, caso não encontrar a chaminé, iria se extinguir no reservatório. Como os reservatórios podem ser considerados de “massa infinita” (muita inércia), eles não conseguem fazer o amortecimento das pressões refletindo-a e causando uma certa ressonância nos equipamentos mecânicos e civis.

Analogamente, a chaminé de montante providencia água durante a partida das turbinas numa hidrelétrica e às vezes o problema é tratado inversamente: emprego da chaminé direciona as características de regulação dos grupos de geração.

Miranda (2000) classifica as chaminés de equilíbrio conforme sua configuração como a seguir:

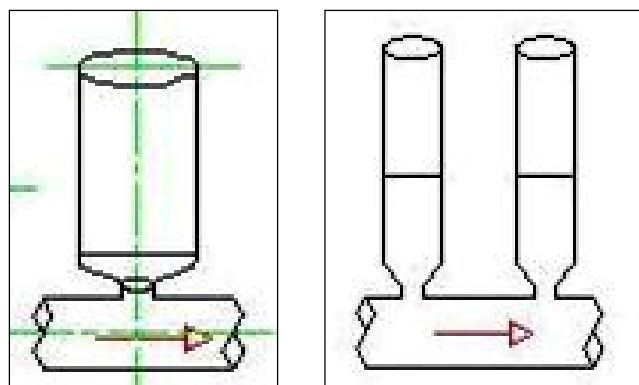
a) Simples (aberta para a atmosfera representada na FIGURA 2.14 e FIGURA 2.15): é a câmara mais simples possível, porém podem ser de eixo inclinado. É comum observar mais de uma chaminé simples nos túneis de carga.



FIGURAS 2.14 e 2.15 – Chaminé de Equilíbrio Tipo Simples e Tipo Simples Oblíqua (MIRANDA, 2000).

A chaminé de equilíbrio simples apresenta entrada sem estreitamento, e deve ser de tamanho adequado para que não extravase, a menos que possua um vertedouro e nunca permita que o ar entre no conduto (STREETER e WYLIE, 1982).

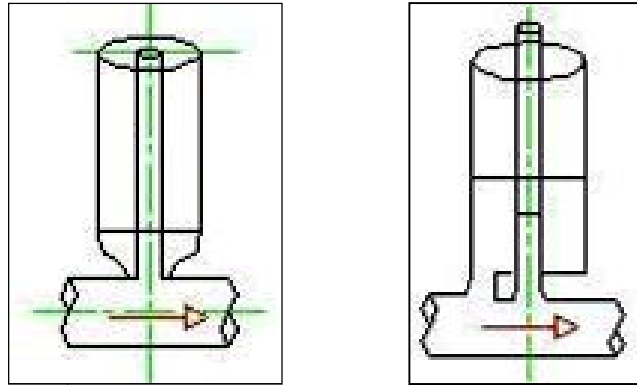
b) Com orifício (aberta para a atmosfera representada na FIGURA 2.16 e FIGURA 2.17): é a chaminé simples composta de um estrangulamento na sua base, onde a seção do orifício é menor que a seção da chaminé.



FIGURAS 2.16 e 2.17 – Chaminé de Equilíbrio com Orifício e Dupla com Orifício (MIRANDA, 2000).

c) Diferencial (aberta para a atmosfera representada na FIGURA 2.18 e FIGURA 2.19): é a chaminé composta de uma chaminé simples por fora e uma chaminé interna cuja seção da base é a área do estrangulamento do orifício. As

alturas das paredes verticais podem ser diferentes ou a altura da parede interna pode ser igual a da parede externa. Existem diversas configurações de chaminés de equilíbrio do tipo diferencial, como: existir comunicação entre as partes ou dois orifícios de entrada.



FIGURAS 2.18 e 2.19 – Chaminés de Equilíbrio Tipo Diferencial (MIRANDA, 2000).

d) De uma Via (aberta para a atmosfera representada na FIGURA 2.20): é a chaminé que contém uma válvula de retenção ou *Flap Valve*, que deixa passar o fluxo somente em uma direção e impede o fluxo na direção contrária. Esta variação obrigatoriamente tem que prever um sistema de esvaziamento operando-o após a estabilização do transiente (quando retorna ao movimento permanente).

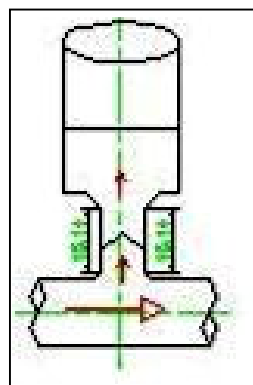
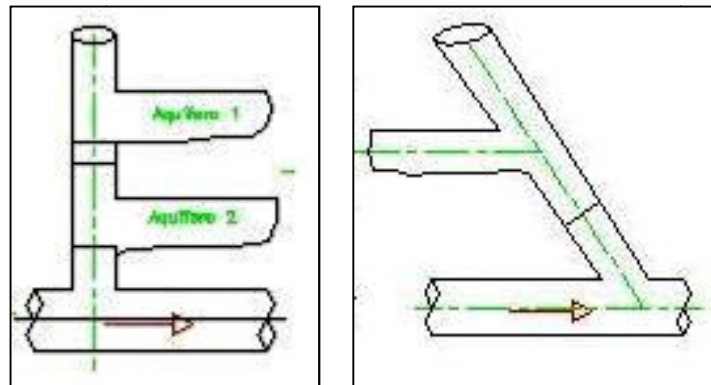


FIGURA 2.20 – Chaminés de Equilíbrio de uma Via (MIRANDA, 2000).

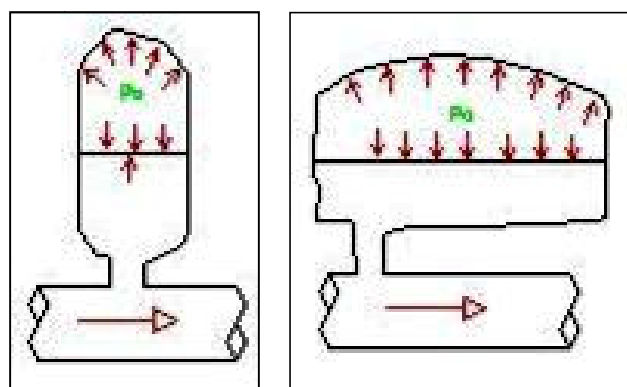
e) Com Câmaras (aberta ou fechada para a atmosfera representada na FIGURA 2.21 e FIGURA 2.22): é a câmara composta de uma chaminé central simples, com uma ou mais galerias dispostas em andares, isto é, dispostas em

elevações diferentes se interligando com o poço principal vertical. Estas galerias normalmente são túneis horizontais abertos na rocha, de preferência, rocha sã, e podem ser distribuídas de diversas formas de circuitos interligando-se entre si, com o objetivo de aumentar o volume de acumulação de água para melhorar a reserva de energia disponível. É comum observar na prática chaminés de equilíbrio que se utilizam dos acessos construtivos e temporários para simular galerias.



FIGURAS 2.21 e 2.22 – Chaminés de Equilíbrio com Galerias (Miranda, 2000).

d) Fechada (tipo pressurizada, não tendo contato com a atmosfera e representada pela FIGURA 2.23 e FIGURA 2.24): é a câmara composta de uma chaminé simples, tendo o seu topo fechado para a atmosfera através de válvula de retenção ou completamente pressurizada com ar comprimido. Esta última só deve ser utilizada em locais rochosos com grau de impermeabilidade suficiente para evitar a possível perda de ar, despressurizando a câmara e livre de abalos estruturais. Quando pequenas e externas podem ser executadas em metal.



FIGURAS 2.23 e 2.24 – Chaminés de Equilíbrio Fechadas (MIRANDA, 2000).

## 2.9 TRATAMENTO ANALÍTICO DOS TRANSIENTES E GOLPES DE ARÍETE

O tratamento do fenômeno dos transientes é sempre dividido em duas partes. A parte “a” é qualitativa e explica o emprego da análise de transientes na engenharia hidroelétrica. A parte “b” é quantitativa e indica os dados, fórmulas, critérios e métodos de análises das oscilações.

### a) Análise Qualitativa

Dois problemas são evidentes na análise. Primeiro é o problema histórico no qual a operação das turbinas leva à definição dos gradientes limites de pressões e de escoamentos nos condutos e das pressões para os equipamentos. Estes aspectos levam aos estudos do sistema que incluem como a coluna de água (pressão) impacta na operação da usina e que este conjunto governa a capacidade de geração (ASCE, 1989).

O engenheiro civil tem a responsabilidade não somente de desempenhar a análise dos transientes, mas de especificar os parâmetros que irão dar subsídios para os estudos de operação. Já estes estudos são detalhados e definem as faixas de operação das turbinas, os quais, geralmente, são desempenhados pelos engenheiros eletricitistas ou engenheiros mecânicos.

As pressões e as vazões dos transientes devem ser avaliadas a cada instalação de um sistema hidráulico sob pressão. Estes estudos estabelecem os gradientes hidráulicos que definem as faixas de operação das pressões dando subsídios para a decisão dos diâmetros hidráulicos, tipos de materiais, espessura das tubulações, especificações geotécnicas aceitáveis nas escavações e de fundação. Indicam o melhor controle na admissão de carga das máquinas geradoras e influenciam no tamanho, tipo e localização das chaminés de equilíbrio. O nível de detalhamento da análise será determinado suficiente quando considerados os fatores como tamanho e importância do circuito, segurança, tipo de operação, pico de produção, interligação da rede, economia, layout, velocidades do escoamento e características das máquinas (ASCE, 1989).

Variações dos transientes são calculadas pelo conhecimento das características físicas dos sistemas de manobra de válvulas, características das máquinas, elasticidade dos condutos, rugosidade das passagens hidráulicas e configuração do circuito hidráulico. Técnicas computacionais em conjunto com o

detalhamento dos critérios adotados convergem para um alto nível de tratamento da análise do golpe de aríete. Cada cálculo específico de operação das válvulas e distribuidores instalados no arranjo em estudo determina a amplitude a qual o golpe de aríete irá alcançar, podendo causar algum alerta ou não.

A ênfase desta etapa é verificar os métodos de análise de forma a atender o grau de detalhe que se pretende alcançar. As análises computacionais foram constantemente substituindo os outros métodos para o dimensionamento final destes sistemas. Alguns métodos computacionais e programas comerciais atuais estão referenciados neste trabalho. No geral, a mesma situação que existe para as análises do transiente existem para outras abrangências hidráulicas e muitos problemas podem ser resolvidos usando somente características adimensionais apropriadas.

Os consolidados ábacos de Allievi são bons exemplos. Assim, dadas as características das tubulações, os ábacos de Allievi têm um papel de desempenhar o golpe de aríete de forma semelhante ao papel dos números de Froude no ressalto hidráulico. No geral, chaminés de equilíbrio, tomadas de ar, transientes de bombas, regulação da máquina (transiente de turbinas) entre outros dispositivos associados ao problema do golpe de aríete podem ser avaliados usando os ábacos e variáveis conhecidas (ASCE, 1989).

As mensurações das pressões de projeto devem ser abordadas no início da fase da engenharia do empreendimento. Circuitos com longos comprimentos e com grande exigência de resposta das máquinas devem receber atenção durante estudos básicos e, em alguns casos, tão cedo quanto o reconhecimento dos sítios ou Projetos de Viabilidade. Os layouts do anteprojeto podem ser realizados com base na experiência, mapas disponíveis, análises gráficas e por fórmulas empíricas que descrevem o fenômeno das pressões.

#### b) Análise Quantitativa

Para esta parte consideram-se os métodos de cálculo dos transientes em condutos sob pressão (tratados como oscilações de níveis na chaminé de equilíbrio). Na sequência deste trabalho alguns métodos mais usuais serão descritos.

O engenheiro, nesta fase, possuindo o domínio da ferramenta definida na análise qualitativa estuda através de análises técnicas/econômicas as alternativas de definição do melhor arranjo do circuito de geração da usina.



### 3 MÉTODOS ANALISADOS

#### 3.1 GERAL

A forma com que foram escolhidos os métodos de dimensionamento de chaminés de equilíbrio fundamentou-se em abranger um conjunto de ferramentas usuais, que engloba diversos tipos de processamento e simulações das oscilações.

O primeiro modelo considera o fenômeno como de aceleração da massa de água no conduto de adução, podendo ser tratado com base nas equações da conservação da quantidade de movimento e da continuidade na forma de diferenciais ordinárias (PINTO, 1987). Ou seja, considera a oscilação da massa no sistema sem considerar a influencia do golpe de aríete (variação brusca da cota piezométrica).

O segundo modelo a ser estudado é um modelo comercial (WANDA3, Delft Hydraulics, 2001) que resolve as equações diferenciais parciais simplificadas dos transientes em condutos através das curvas características. Este representará toda a gama dos programas comerciais que utilizam o método das características.

O terceiro e o quarto modelos solucionam as equações do conduto forçado (equações diferenciais parciais) através de métodos de diferenças finitas.

O quinto método a ser estudado é através dos critérios que a Eletrobrás desenvolveu para projetar chaminés de equilíbrio preliminares e em PCH's.

Com estas ferramentas preparadas parte-se para o desenvolvimento da plataforma de aquisição de dados por parte de um pequeno protótipo (modelo reduzido genérico de uma chaminé de equilíbrio genérica) já instalado nas dependências da UFPR.

Após a tomada de dados almejados, principalmente pelas oscilações no interior da chaminé, foram feitas as simulações de todos os métodos de cálculo matemático. Os dados de entrada serão inseridos considerando a geometria real do protótipo em estudo, vazão observada e tempo de manobra, para que os resultados representem da melhor forma o protótipo e os fenômenos de oscilação de massa envolvidos.

Com isto tudo, é possível observar e analisar de forma crítica a sensibilidade destes métodos de dimensionamento de chaminés de equilíbrio e concluir sobre possíveis divergências, limites de aplicações e a qualidade das respostas.

A seguir desenvolvem-se os modelos analisados.

### 3.2 Modelo da Aceleração da Massa de Água no Conduto de Adução

Para o desenvolvimento deste método matemático consideram-se as seguintes hipóteses:

- a) Fluido Perfeito: densidade do fluido =  $1000 \text{ kg/m}^3$  (água); temperatura constante; fluido incompressível. Então, a densidade do fluido é constante;
- b) Distribuição constante da velocidade média na seção transversal do tubo;
- c) O amortecimento das ondas na chaminé é feito exclusivamente através das perdas de carga do sistema, devido à característica do aproveitamento até a sua estabilização (movimento permanente até outra condição de movimento permanente);
- d) O modelo não considera a transformação da energia cinética ou potencial em energia de pressão nos condutos e a seção transversal nominal do conduto de adução se mantém constante;
- e) O modelo não leva em consideração as perdas de carga produzidas nas válvulas ou distribuidores. Sabe-se que essas podem contribuir significativamente na variação da carga hidráulica;
- f) Não considera a perda de carga produzida pelo atrito entre o fluxo e parede no interior da chaminé de equilíbrio, ou alguma galeria, e variação da seção transversal;
- g) No caso de fechamento ou abertura da válvula, a vazão varia constantemente, obedecendo a uma lei do primeiro grau em função do tempo de fechamento ou abertura;
- h) As vazões correspondentes ao circuito de geração são variadas instantaneamente após o início do distúrbio. O comprimento do conduto é considerado “nulo”, por isto a vazão instantânea ao longo de todo seu comprimento é uma só. A simulação do transiente hidráulico é feita instantaneamente após o início da manobra da válvula;

i) Aplica-se a uma chaminé de equilíbrio de montante da válvula, do tipo simples.

A característica geométrica do circuito é composta de:

a) Um reservatório de área infinita: o reservatório tem seu nível d'água fixo e não oscila quando ocorre o transiente, pois é considerado como área infinita;

b) Um túnel de adução: o túnel de adução liga hidráulicamente o reservatório à chaminé de equilíbrio e à válvula com seção constante;

c) Uma chaminé de equilíbrio: a chaminé de equilíbrio é do tipo aberta (pressão atmosférica), com seção constante, podendo ter um estreitamento na sua base;

d) Uma válvula de controle de vazão: a válvula simula a vazão passante na turbina e produz o transiente.

A seguir apresenta-se a FIGURA 3.1 que define geometricamente o desenvolvimento do modelo. Este método será chamado de EDO, pois resolve as equações diferenciais ordinárias apresentadas a seguir.

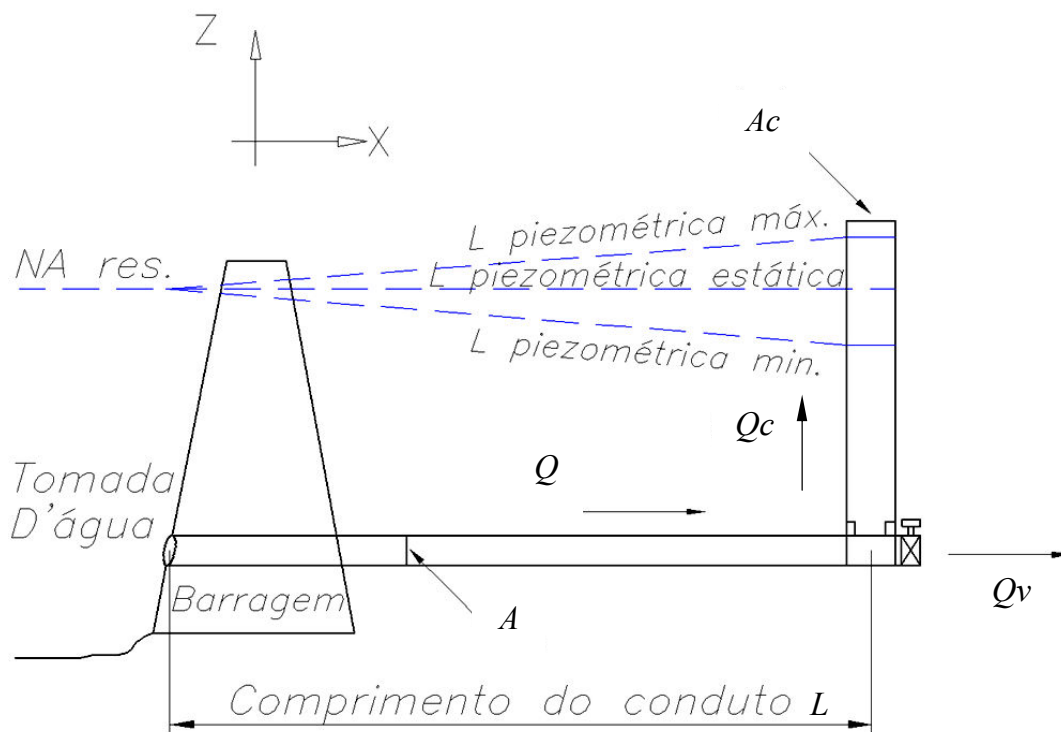


FIGURA 3.1 – Característica do Circuito do Modelo DF-EDO.

As formulações levadas em consideração para tratar dos cálculos de escoamentos não-permanente são semelhantes às apresentadas na apostila do curso de Hidráulica Aplicada do programa de pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da UFPR, do professor Nelson L. de S. Pinto (1987).

Equação da Conservação da Quantidade de Movimento:

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = \Delta Z - \text{perdas} \quad (3.1)$$

Onde,

$L$  = comprimento do túnel/conduto forçado, em m;

$g$  = aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>;

$V$  = velocidade média do escoamento, em m/s;

$dt = \Delta t = T_{i+1} - T_i$  = passo de tempo/período de cálculo, em segundos.

$\Delta Z$  = Energia/Carga Hidráulica, em m;

$\text{perdas}$  = perdas de carga totais no circuito, em m.

O segundo termo da equação (3.1) trata da aceleração do escoamento.

Transformando velocidade em uma função de vazão e área, aproximando por diferenças finitas na forma linear:

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{1}{dt} \cdot \frac{(Q_i - Q_{i-1})}{A} = \Delta Z_{i-1} - \text{perdas}_{i-1} \quad (3.2)$$

Onde,

$Q$  = vazão no conduto forçado (ou túnel forçado), em m<sup>3</sup>/s;

$A$  = área da seção transversal do túnel/conduto forçado, em m<sup>2</sup>.

$$Q_i = (Z_0 - Z_{c_{i-1}} - \text{perdas}_{i-1}) \cdot \frac{A \cdot g \cdot \Delta t}{L} + Q_{i-1} \quad (3.3)$$

Onde,

$Z_0$  = nível de água do reservatório, em m.

Perdas de Carga:

$$perdas = \Delta Z' + \Delta Z'' \quad (3.4)$$

Onde,

$\Delta Z'$  = perdas de carga contínuas, em m;

$\Delta Z''$  = perdas de carga localizadas, em m;

As perdas contínuas são as perdas de carga referentes ao escoamento que ocorre no túnel de adução de montante da chaminé de equilíbrio.

$$\Delta Z' = f' \cdot \frac{1}{8.Rh.g} \cdot \left( \frac{Q}{A} \right)^2 \quad (3.5)$$

Onde,

$Rh$  = raio hidráulico do túnel/conduto forçado, em m;

Ao longo do túnel de adução podem existir locais onde há perdas de carga localizadas. É possível fazer o somatório dos coeficientes (que na equação abaixo está como  $f''$ ) e aplicar no modelo.

$$\Delta Z'' = \frac{\sum f''}{2.g} \cdot \left( \frac{Q}{A} \right)^2 \quad (3.6)$$

Para o cálculo do estrangulamento da chaminé utiliza-se a equação:

$$K_o = \frac{0,7}{2.g.Ac} \cdot \frac{1-c^2}{c^2} \quad (3.7)$$

Onde,

$c$  = relação entre áreas, sendo (área do orifício de estrangulamento/ $Ac$ );

E ainda para a perda de carga de entrada utiliza-se  $K=0,98$  (CALAME e GADEN, 1926).

$$\Delta Z''' = (0,98 + K_o) \cdot \frac{v_1^2}{2g} \quad (3.8)$$

Equação da Continuidade:

$$Q = Q_c + Q_t \quad (3.9)$$

Onde,

$Q_c$  = vazão na chaminé de equilíbrio, em  $m^3/s$ ;

$Q_t$  = vazão na turbina, em  $m^3/s$ .

Partindo da fórmula pura da conservação de massa dividindo o fluxo do conduto para a chaminé e a turbina, a parte da vazão da chaminé é convertida em uma função da elevação do nível de água:

$$Q = Ac \cdot \frac{dZ_c}{dt} + Q_t \quad (3.10)$$

Onde,

$Ac$  = área da seção transversal da chaminé, em  $m^2$ ;

$Z_c$  = nível de água na chaminé (cota piezométrica no local da chaminé), em m.c.a;

Fazendo a aproximação linear:

$$Q_{i-1} = Ac \cdot \frac{1}{\Delta t} \cdot (Zc_i - Zc_{i-1}) + Q_{t_{i-1}} \quad (3.11)$$

A solução do problema considerando este método foi realizado através da ferramenta computacional EXCEL.

### 3.3 MODELO DAS CARACTERÍSTICAS - WANDA

O programa usado para analisar a gama de métodos de resolução pelo método das características foi o WANDA 3 – *Water Analysis Data Advisor*, desenvolvido na renomada instituição holandesa *Delft Hydraulics*.

Trata-se de um avançado pacote de *software* interativo usado para apoiar o processo de concepção de um sistema hidráulico de condutos sob pressão. O programa é usado para a análise de fluxo permanente e transitório em condições operacionais arbitrárias. As condições primárias de avaliação e otimização de um arranjo de rede de fluxos hidráulicos são: a capacidade de escoamento, velocidade, fluxo de distribuição, o comportamento dinâmico, economia, segurança e controle. Com estas considerações pode-se dirigir o processo de engenharia de um sistema eficiente (DELFT HYDRAULICS, 2001).

Percebe-se que sua grande desvantagem, como na maioria dos softwares comerciais, é somente permitir trabalhar com seções de conduto circulares.

O *WANDA Transient* é uma extensão do WANDA 3 para simular o comportamento dinâmico dos fluidos em adutoras simples e sistemas ramificados. O programa permite ao usuário simular condições estáveis e condições transientes e golpes de aríete bruscos em redes, não importando o tamanho, tipo de líquido ou condições operacionais. É possível especificar as ações de componentes reguladores de fluxos a fim de criar fenômenos transitórios, tais como fechamento e abertura de válvula, bomba de recalque, variando pressões e vazões médias. Existem possíveis dispositivos de segurança que podem ser avaliados, tais como chaminés de equilíbrio, válvulas de admissão de ar, válvulas reguladoras de pressão e proteger o sistema. O programa WANDA determina se ocorre a cavitação, ou a

ruptura da coluna de água, devido à ebulição por se atingir a pressão de vapor (DELFT HYDRAULICS, 2001).

A teoria que rege os cálculos do programa WANDA 3 trata das formulações para escoamentos não-permanentes pelo método das características. Os condutos podem seguir a teoria da coluna rígida ou da coluna maleável baseada no módulo de elasticidade do material. Para a descrição de um fluido de temperatura constante, duas equações são levadas em consideração, da conservação da quantidade de movimento e da continuidade (ou conservação da massa).

Equação da Conservação Quantidade de Movimento:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (3.12)$$

Onde,

$V$  = velocidade média da seção, em m/s;

$H$  = carga hidráulica, em m;

$s$  = coordenada axial (ao longo do tubo), em m;

$g$  = aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>;

$f$  = coeficiente de atrito do tubo;

$D = 2R$  = diâmetro interno do tubo, em m;

Equação da Continuidade:

$$\frac{\rho_f g}{K_f} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{2}{R} \frac{\partial u_R}{\partial t} = 0 \quad (3.13)$$

Onde,

$\rho_f$  = densidade do fluido, em kg/m<sup>3</sup>;

$K_f$  = módulo de pressão do fluido, em N/m<sup>2</sup>;

$u_R$  = espaçamento radial da parede do tubo, em m;



A carga hidráulica é definida por:

$$H = \frac{P}{\rho_f g} + h_1 \quad (3.14)$$

Onde,

$P$  = pressão média do fluido, m.c.a.;

$h_1$  = elevação entre a linha de centro do tubo e o plano de referência arbitrário, m.

As suposições iniciais para simplificação da resolução são :

a) O terceiro termo da equação (3.12) representa o atrito entre a parede do tubo e o fluido. O atrito é modelado da mesma forma que em regime permanente.

b) Nas equações (3.12) e (3.13) os termos convectivos como  $\partial V / \partial s$  são negligenciados. Isto é permitido somente quando  $V$  é muito menor do que a velocidade da onda de pressões. Esta suposição é conhecida na literatura como aproximação acústica.

c) A suposição do problema do fluxo unidimensional somente é válida para ondas de pressão com baixa frequência. Na bibliografia esta suposição é conhecida por aproximação comprimento de onda longa.

A equação da continuidade (3.13) pode ser transformada numa forma mais convencional. Para isto, transforma-se através da relação do módulo de elasticidade do tubo:

$$\frac{u_R}{R} = \frac{1}{E}(\sigma_\phi - \nu \sigma_s) \quad \text{ou,} \quad \sigma_s = \frac{E}{1 - \nu^2} \left( \frac{\partial u_s}{\partial s} + \nu \frac{u_R}{R} \right) \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial s} = \frac{1}{E}(\sigma_s - \nu \sigma_\phi) \quad \text{ou,} \quad \sigma_\phi = \frac{E}{1 - \nu^2} \left( \frac{u_R}{R} + \nu \frac{\partial u_s}{\partial s} \right) \quad (3.16)$$

Onde,

$\sigma_s$  = tensão axial do tubo, em N/m<sup>2</sup>;

$\sigma_\phi$  = tensão normal do tubo, em N/m<sup>2</sup>;

$E$  = módulo de Young, em N/m<sup>2</sup>;

$\nu$  = módulo de Poisson.

Por estas relações, a equação da continuidade pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\rho_f}{K_f} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{2}{gE} \frac{\partial \sigma_\phi}{\partial t} - \frac{2}{gE} \frac{\partial \sigma_s}{\partial t} = 0 \quad (3.17)$$

Aplicando novamente a simplificação do comprimento de onda longa, ou seja, a inércia radial a partir da parede do tubo é negligenciada. Assim, uma derivação importante pode ser feita desta equação conforme abaixo:

$$\sigma_\phi = \frac{PR}{e} \quad (3.18)$$

De fato, esta equação pode ser interpretada observando que as forças aplicadas nas direções radiais do tubo estejam em equilíbrio. Portanto, nesta dimensão não terá nenhum efeito dinâmico envolvido. Substituindo a equação (3.18) em (3.17):

$$\frac{\rho_f}{K_f} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{2R}{gEe} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{2\nu}{gE} \frac{\partial \sigma_s}{\partial t} = 0 \quad (3.19)$$

A pressão  $P$  pode ser expressa em termos de  $H$  por meio da equação (3.20):

$$P = \rho_f g(H - h) \quad (3.20)$$

Derivando em relação ao tempo,

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \rho_f g \left( \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial h}{\partial t} \right) \quad (3.21)$$

Nesta equação é negligenciada a influência de  $\partial h / \partial t$  em  $\partial P / \partial t$ :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \rho_f g \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.22)$$

Substituindo (3.22) em (3.19) leva a equação da continuidade na forma:

$$\frac{1}{c_f^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial s} - \frac{2\nu}{gE} \frac{\partial \sigma_s}{\partial t} = 0 \quad c_f^2 = \frac{K_f}{\rho_f} \left( 1 + \frac{DK_f}{Ee} \right)^{-1} \quad (3.23)$$

Onde,

$c_f$  = velocidade de propagação da onda, em m/s;

$E$  = elasticidade do tubo, em N/m<sup>2</sup>;

$e$  = espessura do tubo, em m;

$D = 2R$  = diâmetro interno do tubo, em m;

$\rho_f$  = densidade do fluido, em kg/m<sup>3</sup>;

$K_f$  = módulo de compressão do fluido, em N/m<sup>2</sup>;

Claro que  $V$  pode ser substituído por  $Q/A_f$ , onde  $A_f$  é a área transversal do conduto.

O último termo da equação da continuidade é função do efeito de *Poisson*. Este termo, como também o efeito de inércia (radial e axial) na parede do conduto, são omitidos na resolução clássica do golpe de arfete. Portanto:

Equação da Conservação da Quantidade de Movimento:

$$\frac{1}{A_f} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \cdot \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{f \cdot Q \cdot |Q|}{2 \cdot D \cdot A_f^2} = 0 \quad (3.24)$$

Equação da Continuidade:

$$\frac{1}{c_f^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{g \cdot A_f} \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (3.25)$$

$$c_f^2 = \frac{K_f}{\rho_f} \left( 1 + \frac{DK_f}{Ee} \right)^{-1} \quad (3.26)$$

Considerando estas hipóteses aplica-se então a resolução das duas equações governantes pelo método das características (MOC). Se considerar  $H$  e  $Q$  como variáveis dependentes, as equações básicas da forma do tubo tornam-se dois conjuntos de equações diferenciais ordinárias, as quais são identificadas por equações curvas  $C^+$  e  $C^-$ .

Curva  $C^+$ :

$$\frac{dH}{dt} + \frac{c_f}{gA_f} \frac{dQ}{dt} + \frac{fc_f}{2gDA_f^2} Q|Q| = 0 \quad (3.27)$$

$$\frac{ds}{dt} = +c_f \quad (3.28)$$

Curva  $C^-$ :

$$\frac{dH}{dt} + \frac{c_f}{gA_f} \frac{dQ}{dt} - \frac{fc_f}{2gDA_f^2} Q|Q| = 0 \quad (3.29)$$

$$\frac{ds}{dt} = -c_f \quad (3.30)$$

As linhas  $C^+$  e  $C^-$  são inclinadas em relação aos lados da uma malha retangular. Aplicando as equações a serem resolvidas, ou seja, para determinar as incógnitas no próximo intervalo de tempo  $H_p$  e  $Q_p$ , parte-se das condições do instante anterior. A FIGURA 3.2 representa graficamente as curvas características.

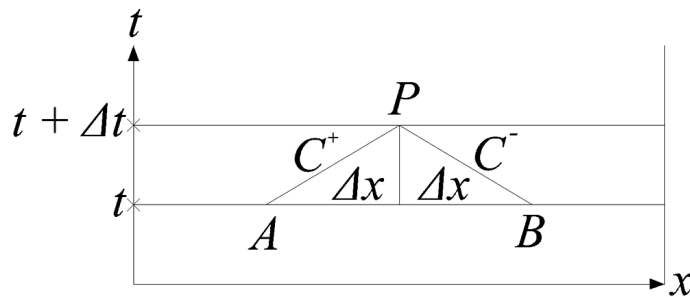


FIGURA 3.2 – Curvas Características (WYLIE e STREETER, 1978).

Se  $H$  e  $Q$  são conhecidos no ponto  $A$  e  $B$ , podem ser integradas as equações (3.27) e (3.29) ao longo das linhas características até o ponto  $P$ , conhecendo a nova etapa no tempo  $t + \Delta t$ .

### 3.4 MÉTODOS POR DIFERENÇAS FINITAS

Nas aplicações de métodos de soluções utilizando diferenças finitas para a solução das derivadas parciais de equações de escoamento não-permanente, deve ser introduzido o conceito do plano das variáveis independentes: espaço *versus* o tempo.

Dependendo do tipo de diferença finita: regressiva, centrada ou progressiva a ser utilizada na solução de determinado problema, dois diferentes esquemas podem ser elaborados. Se a aproximação por diferença finita das derivadas parciais for expressa em termos de valores das variáveis de tempo conhecido, este tipo é chamado de esquema explícito. Se, por outro lado, a aproximação por diferença finita da derivada espacial for expressa em termos de valores das variáveis na linha de tempo desconhecida, é chamado de esquema implícito (CASTANHARO, 2003).

A condição de Courant, também conhecida por CFL (Courant, Friedrichs e Lax) é fundamental para a estabilidade e convergência dos métodos ditos como explícitos (STEINSTRASSER, 2005).

A garantia de uma boa convergência e estabilidade dos cálculos está na definição dos valores de  $\Delta t$  e  $\Delta x$ , pois a relação de Courant corresponde à:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{v + a} \quad (3.31)$$

Onde,

$v$  = velocidade do escoamento permanente;

$a$  = celeridade da onda.

Esta condição tem que ser verificada sempre antes de uma nova entrada de dados nos modelos explícitos.

A seguir os tópicos 3.4.1 e 3.4.2 tratam de resoluções das equações por diferenças finitas, sendo 3.4.1 através de um esquema explícito e 3.4.2 através de um esquema implícito.

#### 3.4.1 Diferenças Finitas pelo Esquema Difusivo de Lax

Propõe-se resolver as equações de escoamentos em condutos forçados pelo Esquema Difusivo de Lax, que é comum para resolução das equações de Saint-Venant.

A aplicação de um método de diferenças finitas para a solução aproximada de um sistema de equações diferenciais está fundamentada no conceito de discretização das variáveis independentes (STEINSTRASSER, 2005). As variáveis independentes são todas menos o espaço e o tempo.

Na resolução do problema obtém-se como variáveis independentes o espaço e o tempo, e como variáveis dependentes a velocidade média nas seções do conduto, ou a vazão e a carga/altura piezométrica  $h$ . O esquema Difusivo de LAX apresenta em um plano das variáveis independentes, plano  $x-t$ , um conjunto de pontos discretos que representam as variáveis dependentes.

As linhas paralelas ao eixo das coordenadas representadas na FIGURA 3.3 são denominadas Linha do Tempo e a discretização temporal corresponde a  $\Delta t$ .

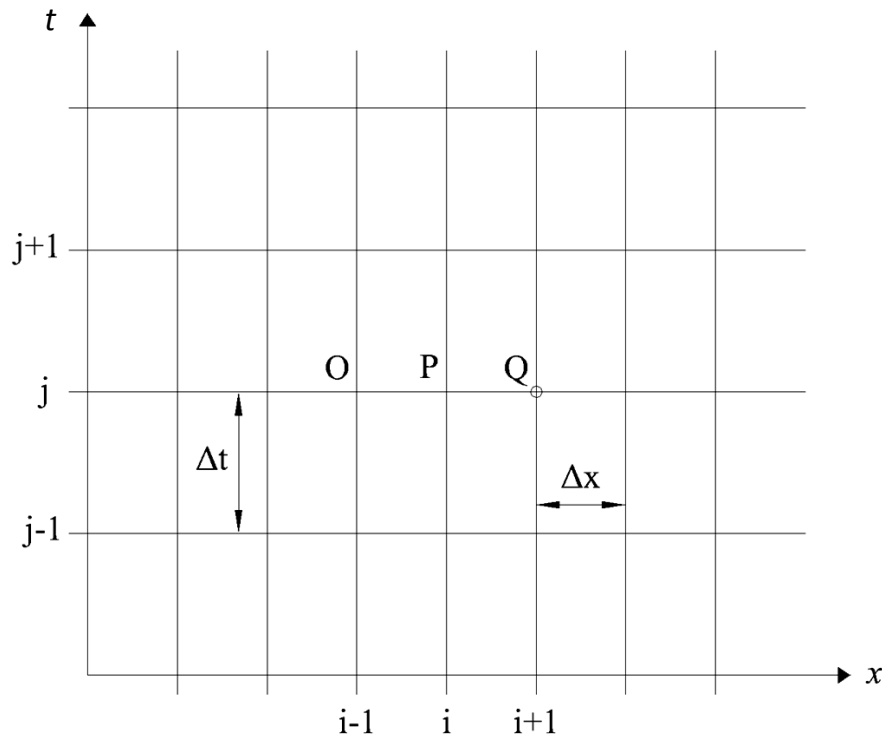


FIGURA 3.3 – Plano de Discretização Explícito (STEINSTRASSER, 2005).

As funções  $v = v(x, t)$  e  $h = h(x, t)$  são representadas por:

$$v_j^i = v(i\Delta x, j\Delta t) \quad \text{e,} \quad (3.32)$$

$$h_j^i = h(i\Delta x, j\Delta t) \quad (3.33)$$

Onde,

$v$  = velocidade instantânea do escoamento;

$h$  = altura piezométrica instantânea;

$t$  = tempo;

$x$  = distância ao longo do conduto.

A discretização do esquema difusivo de Lax das derivadas parciais são resolvidas pelas seguintes aproximações por diferenças finitas centradas:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{v_i^{j+1} - v^*}{\Delta t} \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h_i^{j+1} - h^*}{\Delta t} \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{v_{i+1}^j - v_{i-1}^j}{2\Delta x} \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h_{i+1}^j - h_{i-1}^j}{2\Delta x} \quad (3.37)$$

Sendo que  $v$  e  $h$  são as médias no instante  $j$ ,

$$v^* = \frac{(v_{i-1}^j + v_{i+1}^j)}{2} \quad (3.38)$$

$$h^* = \frac{(h_{i-1}^j + h_{i+1}^j)}{2} \quad (3.39)$$

As equações, na forma não-conservativa, do escoamento não-permanente unidimensional em condutos, que representam a conservação da quantidade de movimento linear e a conservação de massa, são as seguintes (WYLIE E STREETER, 1978):

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + f \frac{Q|Q|}{2DA} = 0 \quad (3.40)$$

Onde,

$Q$  = vazão escoada, m<sup>3</sup>/s;

$g$  = aceleração da gravidade, m/s<sup>2</sup>;

$f$  = fator de resistência de Darcy-Weisbach;

$D$  = diâmetro hidráulico do conduto, m;



$A$  = área da seção transversal do conduto, m<sup>2</sup>;

$$\frac{Q}{A} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{Q}{A} \sin(\alpha) + \frac{a^2}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.41)$$

Onde,

$\alpha$  = ângulo do eixo do conduto com a horizontal, graus;

Substitui-se nas equações (3.40) e (3.41) as equações de discretização por Lax (3.34) a (3.39), obtém-se primeiro a equação da quantidade de movimento, isolando o ponto velocidade  $j+1$ :

$$v_i^{j+1} = \frac{(v_{i-1}^j + v_{i+1}^j)}{2} - \Delta t \cdot \left[ g \cdot \frac{(h_{i+1}^j - h_{i-1}^j)}{2\Delta x} + \frac{(v_{i-1}^j + v_{i+1}^j)}{2} \cdot \frac{(v_{i+1}^j - v_{i-1}^j)}{2\Delta x} + \dots \right. \\ \left. \dots \frac{f}{2D} \cdot \left( \frac{(v_{i-1}^j + v_{i+1}^j)}{2} \cdot \left| \frac{(v_{i-1}^j + v_{i+1}^j)}{2} \right| \right) \right] \quad (3.42)$$

Equação da conservação da energia, no momento  $j+1$  da carga piezométrica.

$$h_i^{j+1} = \frac{(h_{i-1}^j + h_{i+1}^j)}{2} - \Delta t \cdot \left[ \frac{a^2}{g} \cdot \frac{(v_{i+1}^j - v_{i-1}^j)}{2\Delta x} + \frac{(h_{i-1}^j + h_{i+1}^j)}{2} \cdot \frac{(h_{i+1}^j - h_{i-1}^j)}{2\Delta x} + \frac{(v_{i-1}^j + v_{i+1}^j)}{2} \cdot \sin \phi \right] \quad (3.43)$$

As equações (3.42) e (3.43), solucionam os pontos internos do conduto  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ , onde  $m$  é o ponto ligeiramente antes da chaminé de equilíbrio. E também os pontos  $m+2$  até  $n$ , que corresponde ao trecho do conduto a jusante da chaminé até a válvula de fechamento rápido. Para os demais pontos são inseridas as condições de contorno para o problema.

O ponto 0 corresponde ao reservatório que segue as seguintes relações de condição de contorno:

$$v_0^{j+1} = v_0^j \quad (3.44)$$

$$h_0^{j+1} = h_r - \frac{f \cdot v_0^j \cdot |v_0^j|}{2 \cdot g} \quad (3.45)$$

Onde,

$h_r$  = elevação do nível constante do reservatório, m;

O ponto  $m + 1$  corresponde à chaminé de equilíbrio que segue as seguintes relações de condição de contorno:

$$h_{m+1}^{j+1} = h_m^{j+1} + k_c \cdot (Q_c(j, \Delta t) | Q_c(j, \Delta t)|) \quad (3.46)$$

$$Q_c[(j+1), \Delta t] = \frac{h_{m+1}^{j+1} - h_{m+1}^j}{\Delta t} \cdot A_c(h_{m+1}^{j+1}) \quad (3.47)$$

$$Q_{m+1}^{j+1} = Q_m^{j+1} - Q_c[(j+1), \Delta t] \quad (3.48)$$

Onde,

$Q_c$  = vazão da chaminé, m<sup>3</sup>/s.

O ponto  $n + 2$  corresponde à válvula de fechamento rápido onde pode ser inserida nas rotinas de cálculos a lei de fechamento ou abertura conforme o tipo de válvula. Seguem as seguintes relações de condição de contorno:

$$Q_{n+2}^{j+1} = Q_T[(j+1), \Delta t] \quad (3.49)$$

Onde,

$Q_T$  = vazão da válvula, m<sup>3</sup>/s.

### 3.4.2 Esquema de Diferenças Finitas Linearizado por Preissmann

O método de resolução por aproximação de Preissmann, para problemas de transitórios em condutos sob pressão, foi sugerido por Kaviski e Franco (1997), e Kaviski, Cumin e Prado (2005) que se propuseram a produzir um método de resolução que deriva das soluções definidas pelos métodos usados para solucionar problemas de escoamento não permanente em canais.

Os primeiros processos de discretização consistiam em avaliar as funções e suas derivadas no ponto médio  $M$  (FIGURA 2.31). Entretanto, Preissmann observou que ocorria uma zona de instabilidade numérica da resolução entre os quatro pontos,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  da discretização implícita “normal” e admitiu uma ponderação incluindo mais dois pontos  $E$  e  $F$  conforme a FIGURA 3.4. Para isto, Preissmann introduziu um coeficiente de ponderação  $\theta$  e constatou que seu esquema é incondicionalmente estável para valores de  $\theta$  maiores que 0,5, e recomendou a utilização de valores no intervalo entre 0,6 e 1,0 (CASTANHARO, 2003).

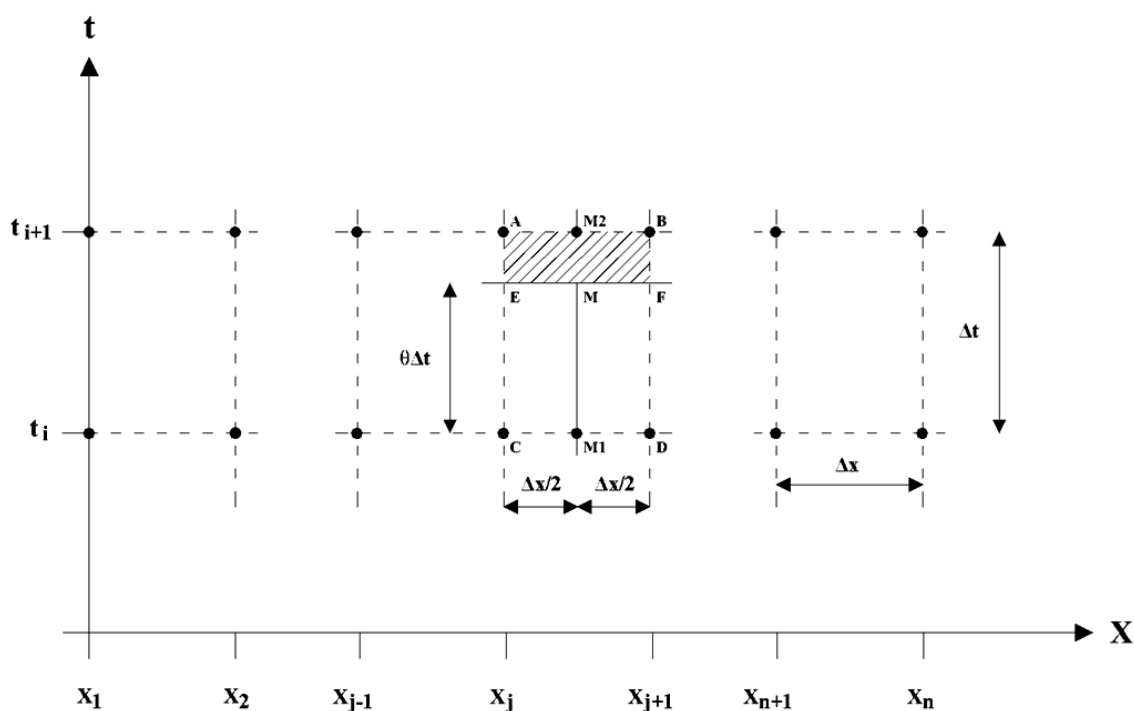


FIGURA 3.4 – Plano de Discretização de Preissmann (CASTANHARO, 2003).

O sistema de equações (3.40) e (3.41) é solucionado substituindo as derivadas e as variáveis dependentes por meio das seguintes aproximações:

$$f(x,t) \approx \frac{[\theta(\Delta f_{j+1} + \Delta f_j) + f_{j+1} + f_j]}{2} \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{[\theta(\Delta f_{j+1} - \Delta f_j) + f_{j+1} - f_j]}{\Delta x} \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx \frac{(\Delta f_{j+1} + \Delta f_j)}{2\Delta t} \quad (3.52)$$

Onde  $f(x,t)$  representa genericamente uma das variáveis dependentes  $H$  e  $Q$ ,  $\theta$  é o coeficiente ponderador ( $0,5 \leq \theta \leq 1$ ),  $(\Delta x = L/n)$ ,  $L$  é o comprimento do conduto,  $N$  é o número de trechos em que subdivide-se o conduto de montante e jusante da chaminé,  $(x = j\Delta x, 0 \leq j \leq n)$ ,  $\Delta t$  é o intervalo de tempo considerado ( $t = n\Delta t$ ),  $\Delta f_j = f_j^{n+1} - f_j^n$ ,  $f_j \equiv f_j^n$ .

Com a aplicação das expressões (3.50), (3.51) e (3.52) nas equações (3.40) e (3.41), resultam duas equações lineares com a seguinte forma:

$$h_j \Delta H_{j+1} + b_j \Delta Q_{j+1} = C_j \Delta H_j + D_j \Delta Q_j + G_j \quad (3.53)$$

$$h_j^1 \Delta H_{j+1} + b_j^1 \Delta Q_{j+1} = C_j^1 \Delta H_j + D_j^1 \Delta Q_j + G_j^1 \quad (3.54)$$

Sendo que os parâmetros são determinados pelas expressões:

$$h_j = \frac{\theta(Q_{j+1} + Q_j)}{2A\Delta x} - \frac{1}{2\Delta t} \quad (3.55)$$

$$b_j = \frac{\theta(H_{j+1} - H_j)}{2A\Delta x} - \frac{\theta \sin(\alpha)}{A} + \frac{\theta a^2}{Ag\Delta x} \quad (3.56)$$

$$C_j = \frac{\theta(Q_{j+1} + Q_j)}{2A\Delta x} - \frac{1}{2\Delta t} \quad (3.57)$$

$$D_j = \frac{\theta(H_{j+1} - H_j)}{2A\Delta x} - \frac{\theta \sin(\alpha)}{A} + \frac{\theta \alpha^2}{Ag\Delta x} \quad (3.58)$$

$$G_j = \frac{(Q_{j+1} + Q_j)(H_{j+1} - H_j)}{2A\Delta x} + \frac{(Q_{j+1} + Q_j)\sin(\alpha)}{A} - \frac{a(Q_{j+1} + Q_j)}{Ag\Delta x} \quad (3.59)$$

$$h_j^1 = C_j^1 = \frac{\theta g A}{\Delta x} \quad (3.60)$$

$$b_j^1 = \frac{\theta(Q_{j+1})}{A\Delta x} + \frac{1}{2\Delta t} + \frac{\theta|Q_j + Q_{j+1}|}{4DA} \quad (3.61)$$

$$D_j^1 = \frac{\theta Q_j}{A\Delta x} - \frac{1}{2\Delta t} - \frac{\theta|Q_j + Q_{j+1}|}{4DA} \quad (3.62)$$

$$G_j^1 = -\frac{(Q_{j+1}^2 + Q_j^2)}{2A\Delta x} - \frac{gA(H_{j+1} - H_j)}{\Delta x} - \frac{f(Q_j + Q_{j+1})|Q_j + Q_{j+1}|}{8DA} \quad (3.63)$$

As equações (3.53) e (3.54) podem ser aplicadas para  $j = 0..n-1$ , resultando em  $2n$  equações e  $2n+1$  incógnitas  $(\Delta H_j, \Delta Q_j, j = 0, \dots, n)$ . O problema é resolvido adicionando-se 2 equações correspondentes às condições de contorno do reservatório de montante e da válvula de jusante. Para a implementação da chaminé de equilíbrio será locado um ponto correspondente a  $m+1$ , de acordo com os conceitos descritos no item anterior, equações (3.46), (3.47) e (3.48).

Soluciona-se o sistema de equações pelo método da dupla-varredura que parte da hipótese da validade das seguintes relações (KAVISKI, CUMIN e PRADO 2005):

$$\Delta Q_{j+1} = E_{j+1} \Delta H_{j+1} + F_{j+1} \quad (3.64)$$

$$\Delta H_j = L_j \Delta H_{j+1} + M_j \Delta Q_{j+1} + N_j \quad (3.65)$$

Sendo que:

$$E_{j+1} = \frac{L_j(C_j^1 + D_j^1 E_j) - h_j^1}{b_j^1 - M_j(C_j^1 + D_j^1 E_j)} \quad (3.66)$$

$$F_{j+1} = \frac{G_j^1 + D_j^1 F_j + N_j (C_j^1 + D_j^1 E_j)}{b_j^1 - M_j (C_j^1 + D_j^1 E_j)} \quad (3.67)$$

$$L_j = \frac{h_j}{C_j + D_j E_j} \quad (3.68)$$

$$M_j = \frac{b_j}{C_j + D_j E_j} \quad (3.69)$$

$$N_j = -\frac{G_j + D_j F_j}{C_j + D_j E_j} \quad (3.70)$$

Por meio das equações (3.66) a (3.70) soluciona-se o sistema de equações (3.64) e (3.65) desde que para o ponto  $j=0$  obtenha-se através da condição de contorno a relação:  $\Delta Q_0 = E_0 \Delta H_0 + F_0$  e pela condição de contorno no ponto  $j=n$  possa ser definido  $\Delta H_n$ . Pode-se mostrar que de modo geral consegue-se definir estas relações para a maioria das condições de contorno existentes conforme abaixo.

Parametrização de condições de contorno do reservatório:

$$\Delta Q_0 = E_0 \Delta H_0 + F_0 = -\frac{2A(H_0)}{\Delta t} \Delta H_0 - \{2Q_0 + Q_e(n\Delta t) + Q_e[(n+1)\Delta t]\} \quad (3.71)$$

$$\Delta H_N = \frac{2Q_N Q_e(n\Delta t) - Q_e[(n+1)\Delta t] + F_N}{[2A(H_N)/\Delta t] - E_N} \quad (3.72)$$

Onde,

$A(H)$  = área horizontal do reservatório, em m<sup>2</sup>;

$Q_e(t)$  = descarga externa, sendo positiva para fora do reservatório, em m<sup>3</sup>/s;

Parametrização de condições de contorno da válvula:

$$\Delta H_N = \frac{(Q_N + F_N)^2 - H_N P_N^2 \tau^2 [(n+1)\Delta t]}{P_N^2 \tau^2 [(n+1)\Delta t] - 2E_N (Q_n + F_n)} \quad (3.73)$$

Onde,

$P_N$  = parâmetro da válvula;

$\tau(t)$  = função do grau de abertura da válvula.

Este método de resolução foi implementado computacionalmente em *Turbo Pascal* por meio de um objeto denominado de ENPC. No objeto ENPC serão incluídos os parâmetros identificadores de cada ramo da rede, em vetores, com os elementos representando os trechos: comprimento (1), diâmetro (d), área do conduto (a), resistência ao escoamento (f) celeridade (ac) e o ângulo do eixo do conduto (alfa). No objeto ENPC são incluídos: (i) um método construtor e um destrutor para alocação e desalocação das variáveis dinâmicas; (ii) procedimentos para a determinação dos coeficientes usados para aplicação do método de diferenças finitas; e (iii) procedimentos para solucionar o sistema de equações pelo método da dupla-varredura.

### 3.5 CRITÉRIOS DA ELETROBRÁS

Este tópico trata de solucionar e dimensionar chaminés de equilíbrio segundo critérios e diretrizes propostas pela Eletrobrás. A seguir, apresenta-se um texto que reúne os métodos definidos pelas bibliografias publicadas pela Eletrobrás: “Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas” de 1984; “Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas” de 2000 e “Manual de Minicentraís Hidráulicas” de 1985.

#### a) Critério Simplificado de Canambra

Um critério simples foi definido pelo Projeto de Canambra (década de 60) que elaborou os Estudos de Inventários nas regiões Sul e Centro Sul do Brasil: Em sistemas isolados, exigindo boa regulação de frequência, chaminés de equilíbrio serão necessárias se a relação entre o comprimento total do conduto e a queda bruta exceder aproximadamente 4. Ocasionalmente, pode ser necessária a chaminé com relações inferiores a 4 se a extremidade superior do perfil do conduto forçado tiver pequena declividade. Em grandes sistemas interligados, as exigências quanto às chaminés de equilíbrio dependem da função prevista para a usina no sistema. Se

a usina deve contribuir para a regulação de frequência e tem uma relação comprimento do conduto para a queda maior do que 4, muito provavelmente necessitará de uma chaminé. Se a usina prevista é pequena com relação ao sistema, planejada para fornecer energia adicional de base, pode funcionar satisfatoriamente com uma relação comprimento-queda de 10, sem chaminé de equilíbrio.

Nos Estudos de Inventário, serão previstas chaminés de equilíbrio:

- Para pequenas usinas com reservatórios, se a relação comprimento-queda exceder 10:1, considerando o nível máximo normal do reservatório;
- Para pequenas usinas quando a relação comprimento-queda exceder 6:1;
- Para grandes usinas quando a relação comprimento-queda exceder 4:1.

#### b) Extensão do Critério Canambra

A fórmula clássica de Michaud para a estimativa da sobrepressão devida ao golpe de aríete:

$$\Delta h = \frac{2VL}{gT_e} \quad (3.74)$$

Onde:

$\Delta h$  = sobrepressão, em m.c.a;

$V$  = velocidade média no conduto forçado para a vazão máxima, em m/s;

$L$  = comprimento do conduto, em m;

$g$  = aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>;

$T_e$  = tempo efetivo de fechamento, em s.

Sugere-se a inclusão da variável velocidade do fluxo no conduto forçado para estender o critério anterior que passa a ser expresso pela condição:

$$LV < 25H \quad (3.75)$$



Ou seja, a chaminé de equilíbrio será necessária se o produto do comprimento do conduto forçado pela velocidade correspondente à máxima vazão ultrapassar 25 vezes a altura bruta de queda.

Tal critério corresponde ao Critério de Canambra para inventários para a velocidade de 6,25 m/s, demonstrando a possibilidade de seu abrandamento para velocidades inferiores.

O golpe de aríete pode ainda ser reduzido pelo aumento do tempo de fechamento. Entretanto, a um maior tempo de fechamento corresponde uma maior sobrevelocidade da turbina. A sobrevelocidade é o aumento da velocidade com relação à rotação nominal, que ocorre quando a carga é subitamente removida do grupo gerador e a turbina continua operando sob controle do regulador. Para condições satisfatórias de regulação de uma unidade isolada, é desejável que a sobrevelocidade seja mantida em torno de 45%.

As condições de regulação da máquina estão, portanto, intimamente ligadas à inércia da água no circuito hidráulico e sua relação com a inércia das massas girantes.

Devido à sua inércia, o grupo turbina-gerador tem um efeito de volante que poderá ser expresso pelo tempo transitório mecânico “starting time” ( $T_s$ ), definido como o tempo em segundos para acelerar a massa girante de zero à velocidade de rotação nominal  $n$ :

$$T_s = \frac{WR^2 n^2}{67000P} \quad (3.76)$$

Onde:

$T_s$  = tempo de aceleração da unidade, em s;

$WR^2$  = efeito de inércia da unidade, em kg.m<sup>2</sup>;

$n$  = rotação síncrona, em RPM;

$P$  = potência da unidade a plena abertura, HP.

Os valores do parâmetro  $WR^2$  do gerador e da turbina deverão ser obtidos junto aos fornecedores do equipamento. Como orientação inicial poderão ser usadas

as seguintes expressões propostas pelo “U.S. Bureau of Reclamation” como valores naturais dos equipamentos:

$$\text{a) Turbina, em kg.m}^2: WR^2 = 1.000 \left( \frac{P}{n^{3/2}} \right) \quad (3.77)$$

$$\text{b) Gerador, em kg.m}^2: WR^2 = 15.000 \left( \frac{kVA}{n^{3/2}} \right) \quad (3.78)$$

Quanto maior o valor de  $T_s$ , maior a estabilidade natural do grupo. Com efeito contrário, age a inércia da água no sistema “conduto forçado – caixa espiral – tubo de sucção”. Essa inércia poderá ser expressa pelo tempo transitório hidráulico,  $T_p$ , correspondente ao tempo necessário para acelerar a massa de água de zero para a velocidade máxima,  $V$ , sob a ação da altura da coluna de água,  $h$ .

$$T_p = \frac{\sum LV}{gh} \quad (3.79)$$

O produto do comprimento e velocidade de cada componente do circuito hidráulico, da tomada de água ou chaminé de equilíbrio ao canal de fuga, deverá ser incluído no somatório  $LV$ .

Segundo prática do “U.S. Bureau of Reclamation”, terão boas condições de regulação as unidades em que:

$$T_s \geq 2(T_p)^2 \quad (3.80)$$

Essa verificação deverá ser feita para todas as condições de queda esperadas para a usina.

O critério expresso por  $T_s \geq 2(T_p)^2$  não é dimensionalmente homogêneo e não faz referência ao tempo de atuação do servomotor, o qual depende do golpe de arfete e da sobrevelocidade da máquina.

A sobrevelocidade poderá ser obtida no gráfico da FIGURA 3.6, da função da relação entre o tempo total de ação do servomotor e o tempo transitório mecânico  $T_c / T_s$  e da rotação específica da turbina

O tempo total de ação do servomotor será igual ao tempo efetivo de fechamento acrescido de 0,25 a 1,5 segundos.

$$T_c = T_s + (0,25 \text{ a } 1,5), \text{ em segundos.} \quad (3.81)$$

Para levar em conta o efeito da sobrepressão decorrente do golpe de aríete, o valor obtido no gráfico da FIGURA 3.5, deverá ser multiplicado pela relação  $(1 + T_p) / T_e$ .

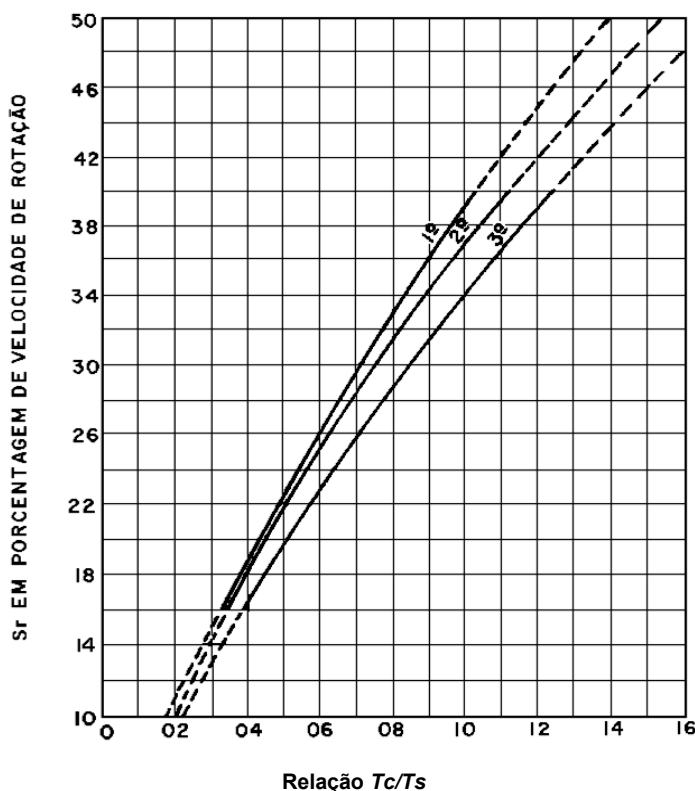


FIGURA 3.5 – Gráfico do Efeito da Sobrepressão do Golpe de Aríete (ELETROBRÁS, 2000).

1ª – ns de 20 a 56 (86 a 249, sistema métrico): turbina Francis para grandes quedas;

2ª – ns de 60 a 80 (267 a 356, sistema métrico): turbina Francis para baixas quedas;

3ª – ns de 100 a 120 (445 a 543, sistema métrico) turbinas hélice.

A questão “golpe de aríete – regulação” envolve diversos aspectos teóricos e práticos complexos, com repercussões econômicas e conflitantes e difíceis de avaliar. Em geral quanto maior a inércia do grupo turbina-gerador, melhor a estabilidade do sistema e as condições de regulação. Por outro lado, um acréscimo de inércia com relação ao mínimo exigido pelas características da máquina representará um aumento de custo, não só do próprio gerador, como devido aos aumentos correspondentes na construção civil e nos equipamentos de carga e manuseio. O aumento de velocidade da máquina não resulta em ganho de inércia considerável e em geral é limitado pelas condições da turbina, normalmente selecionada para operar com velocidades altas, próximas ao limite prático superior.

As exigências quanto à inércia são tanto mais importantes quanto maior a dimensão da máquina em relação ao sistema servido. Em geral, uma unidade que fornece cerca de 40% ou mais do total da carga deve ser tratada como unidade isolada. Igualmente, se a usina pode ficar temporariamente isolada de parte do sistema por um acidente em uma linha de transmissão, suas condições de operação tornam-se mais críticas e devem ser levadas em consideração.

As variações de frequência permissíveis dependem, a rigor, do tipo de carga. Quanto mais rígidas as especificações relativas à faixa de variação de frequência permitida, maior a inércia requerida para um dado circuito hidráulico e maiores custos resultam para o aproveitamento.

Circuitos hidráulicos mais curtos resultantes de uma chaminé de equilíbrio correspondem a menores golpes de aríete e menor necessidade de inércia girante para uma dada especificação de constância da frequência. Aos golpes de aríete estão ligadas sobrevelocidades decorrentes do excesso momentâneo de energia hidráulica resultante da maior queda, com o correspondente prejuízo para as condições de regulação.

Em grandes turbinas de baixa queda com condutos forçados curtos, o tempo de fechamento do distribuidor pode ser limitado pela condição de não ruptura da coluna de água no tubo de sucção. Fechamentos muito rápidos podem, neste caso,

resultar no rompimento da coluna de água ao qual segue um golpe positivo de pressão que age sobre a turbina e as pás diretrizes a partir de jusante.

A máxima depressão,  $h$ , poderá ser avaliada pela expressão:

$$\Delta h = \varepsilon \frac{LaVa}{gTc} \quad (3.82)$$

Onde:

$\Delta h$  = depressão máxima, em m.c.a;

$Va$  = velocidade média no tubo de sucção, em m/s;

$La$  = comprimento do tubo de sucção, em m;

$\varepsilon$  = 1 a 1,7, variando com o comprimento do tubo de sucção (1 para tubos curtos a 1,7 para tubos longos).

A redução da velocidade do fluxo no conduto forçado reduz as necessidades de inércia do grupo, mas implica em acréscimo de custo na obra de adução. O gráfico da FIGURA 2.24, traduz a experiência da "Montreal Engineering Co. Ltda", e permite uma avaliação das condições de regulação de frequência do grupo, levando em consideração boa parte dos fatores comentados acima.

Nas ordenadas é apresentada a relação entre o tempo transitório hidráulico e o tempo efetivo do regulador  $Tp / Te$ .

No estudo da "Montreal Engineering", é proposta, para o cálculo de  $Tp$ , a fórmula alternativa:

$$Tp = \frac{(L_r + L_s + L_p)V}{gh} \quad (3.83)$$

Onde:

$L_r$  = comprimento da chaminé de equilíbrio, em m;

$L_s$  = metade do comprimento da caixa espiral, m;

$L_p$  = comprimento do conduto forçado, em m;

$V$  = média das velocidades da água a plena carga no conduto forçado, caixa espiral e tubo de sucção, em m;

$h$  = queda útil da usina, em m.

O comprimento do tubo de sucção será desprezado, mas a velocidade média nesta parte do conduto hidráulico deverá ser levada em conta na definição de  $V$ . Quanto maior a relação  $T_p / T_e$ , maior o golpe de aríete, não ultrapassando, em geral, o valor de 0,4; que corresponde, na prática, a um golpe de aríete de 50%.

Nas abscissas do gráfico da FIGURA 2.33 está a relação entre o tempo transitório mecânico e o tempo total do regulado  $T_s / T_c$ .

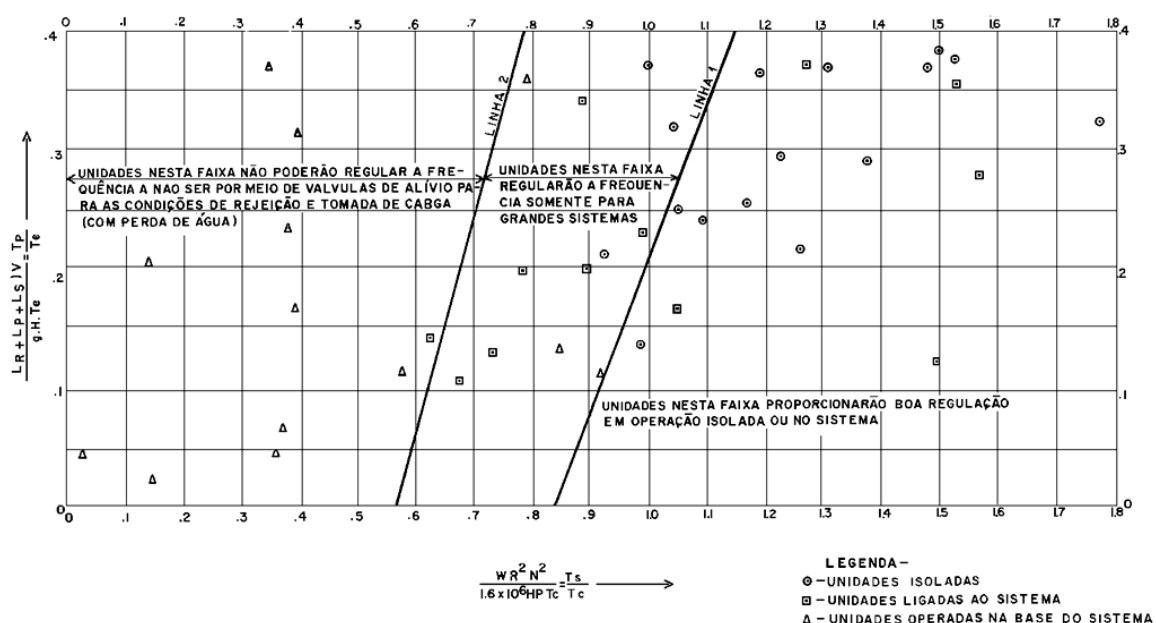


FIGURA 3.6 – Gráfico do Tempo Transitório x Tempo Regulado (ELETROBRÁS, 2000).

O gráfico, através da plotagem de cerca de 40 usinas projetadas pela "Montreal Engineering", sugere uma divisão em três faixas distintas, classificando a zona de boa regulação para grupos isolados à direita, boa regulação quando em sistemas interligados no centro e a região correspondente à não participação na regulação de frequência à esquerda:

À direita situam-se as usinas que fornecem energia a instalações de mineração, com pás móveis, que resultam em condições de carga rapidamente variáveis. Incluem grupos com inércia acrescida, não sendo raros geradores com 60

a 75% mais inércia do que o normal;

Na zona central do gráfico as usinas conectadas a sistemas isolados de dimensões moderadas, geralmente operando satisfatoriamente com a inércia padrão mínima, quando três ou mais unidades suprem o sistema;

À esquerda, unidades que operam na base, diversas com condutos forçados muito longos, com tempos de regulação amplos ou providos de válvulas de alívio de pressão. Não são usadas para controle da frequência do sistema.

#### c) Necessidade de chaminé de equilíbrio

As chaminés de equilíbrio serão adotadas se o correspondente efeito de redução do golpe de aríete resultar em uma alternativa "circuito hidráulico de adução turbina" mais econômica, ou para atender as limitações de sobrevelocidade exigidas pela regulação do grupo;

Chaminés de equilíbrio não serão necessárias nas usinas que se situarem à direita da linha 1 no gráfico da FIGURA 3.6, considerando-se a inércia natural do gerador e da turbina.

Se o ponto característico da usina situar-se entre as linhas 1 e 2 para inércia natural do grupo, não será necessária a chaminé de equilíbrio se a participação da usina no sistema interligado for inferior a 40%, levando-se em conta o menor sistema a ser atendido pela usina.

No caso do ponto característico natural da usina situar-se à esquerda da linha 2, será necessário prever chaminé de equilíbrio ou aumentar o  $WR^2$  do grupo para permitir a participação da usina no controle de frequência do sistema, atendendo os critérios 2 e 3 acima. A alternativa sem chaminé de equilíbrio e sem a participação da usina no controle da frequência, se for o caso, será confrontada em termos econômicos para a seleção do esquema final do aproveitamento.

#### d) Dimensionamento da Chaminé de Equilíbrio

A chaminé de equilíbrio deverá satisfazer as seguintes condições.

d.1) Condição de Sparre: para garantir a reflexão da onda e propiciar uma proteção satisfatória ao conduto de adução a montante da chaminé.

$$F > f \quad (3.84)$$

Onde,

$F$  = área da seção transversal da chaminé, em m<sup>2</sup>;

$f$  = área da seção transversal da adução na bifurcação com a chaminé, em m<sup>2</sup>;

d.2) Condição de Thoma: para garantir a estabilidade da chaminé.

$$F > F_T \quad (3.85)$$

$$F_T = \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{fL}{h(H-h)} \quad (3.86)$$

Onde,

$F$  = área da seção transversal da chaminé, em m<sup>2</sup>;

$F_T$  = área mínima da seção transversal da chaminé – Seção de Thoma, em m<sup>2</sup>;

$F_r$  = área final da seção transversal da chaminé, em m<sup>2</sup>;

$V$  = velocidade do escoamento para vazão nominal, em m/s;

$f$  = área do conduto de adução, em m<sup>2</sup>;

$L$  = comprimento do conduto de adução, em m<sup>2</sup>;

$H$  = queda bruta mínima da usina (diferencia entre a cota mínima do reservatório de montante e a cota de restituição da usina), em m;

$h$  = perda de carga ao longo do conduto de adução para a vazão nominal (até a chaminé de equilíbrio), em m.

No caso da condição de Thoma ser satisfeita com pequena margem de segurança, ou seja,  $F_T < F < 1,2 F_T$ , a questão de estabilidade da chaminé será analisada com maior detalhe, levando em conta as perdas de carga na entrada da chaminé de equilíbrio e no conduto forçado, bem como nas curvas de rendimento da turbina. Será igualmente verificada a estabilidade pela simulação da variações de



carga finitas, iguais a 10 a 20% da potência nominal do grupo, inicialmente operando a 80% da sua potência nominal.

e) Critério de dimensionamento

A chaminé será sempre dimensionada para a hipótese de rejeição rápida da vazão máxima, correspondente ao desligamento total da usina quando em plena carga para o nível máximo normal (definição de pico máximo das oscilações) e mínimo normal da operação (definição de vale máximo das oscilações) do reservatório.

O dimensionamento para manobras de admissão de água será definido em função da situação da usina com relação ao sistema:

- Para usina isolada ou atendendo mais do que 40% do sistema, o dimensionamento deverá prever a abertura rápida de zero à plena vazão, considerando o nível mínimo normal do reservatório.

- Para usina em sistema interligado, responsável por menos de 40% da carga, o dimensionamento deverá prever a abertura rápida de 50 a 100% da vazão máxima, considerando o nível mínimo normal do reservatório.

### 3.5.1 Diretrizes para Instalação de Chaminé de Equilíbrio em PCHs

Quando necessário, a chaminé de equilíbrio deve ser instalada o mais próximo possível da casa de força, para reduzir o comprimento do conduto forçado e diminuir os efeitos do golpe de aríete.

a) Verificação da Necessidade de Instalação da Chaminé de Equilíbrio:

A indicação inicial para que não haja necessidade da instalação de uma chaminé de equilíbrio é obtida a partir da relação a seguir.

$$\frac{L_{ef}}{H_b} \leq 5 \quad (3.87)$$

Onde,

$L_{cf}$  = comprimento do conduto forçado, em m;

$H_b$  = queda bruta, em m.

Assim, se  $L_{cf} > 5H_b$ , tem-se uma indicação inicial de que uma chaminé de equilíbrio poderá ser necessária. A verificação desta necessidade deverá ser feita pelo critério da constante de aceleração do escoamento no conduto forçado, como apresentado a seguir.

$$t_h = \frac{v_{cf} L_{cf}}{g H_b} \quad (3.88)$$

Onde,

$t_h$  = tempo de aceleração do escoamento no conduto forçado, em s;

$v_{cf}$  = velocidade do escoamento no conduto forçado, em m/s;

$g$  = aceleração da gravidade; 9,81; em m/s<sup>2</sup>.

Para  $t_h < 3,0$  segundos, não há necessidade de instalação da chaminé. Para valores entre 3,0 segundos e 6,0 segundos a instalação é desejável mas não obrigatória. Para  $t_h < 6,0$  segundos, é obrigatória a instalação da chaminé.

Destaca-se que a constante de aceleração do escoamento no conduto forçado guarda uma relação com a constante de aceleração do grupo turbina-gerador, que deve satisfazer, igualmente, os critérios de sobrepressão máxima admissível.

A instalação de uma válvula de alívio na entrada, ou na caixa espiral da turbina, pode evitar a necessidade da chaminé. No entanto, essa solução deve ser analisada criteriosamente, considerando a segurança que deve haver, na abertura da mesma, em caso de fechamento rápido do distribuidor.

b) Dimensionamento de uma Chaminé de Equilíbrio do Tipo Simples e de Seção Constante:

Para garantir a estabilidade das oscilações do nível d'água no interior da chaminé de equilíbrio, essa estrutura deve ter uma seção transversal com área interna mínima, calculada pela fórmula de Thoma, como apresentado a seguir.

$$A_{th} = \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{L_{ta} A_{ta}}{(H_{\min} - h_{ta}) h_{ta}} \quad (3.89)$$

Onde,

$L_{ta}$  = comprimento da tubulação adutora, em m;

$A_{ta}$  = área interna da seção transversal da tubulação adutora, em m<sup>2</sup>;

$H_{\min}$  = queda mínima, em m;

$h_{ta}$  = perda de carga no sistema adutor, entre a tomada d'água e a chaminé, em m;

$v$  = velocidade do escoamento na tubulação adutora, em m/s;

$g$  = aceleração da gravidade; 9,81; em m/s<sup>2</sup>.

A altura da chaminé de equilíbrio  $H_c$  é determinada em função da oscilação do nível d'água no seu interior, da seguinte forma:

Desprezando-se as perdas no sistema adutor, pode-se calcular a elevação  $Y_e$  do nível d'água estático máximo e a depleção  $Y_d$  do nível d'água estático mínimo pela fórmula.

$$Y_e = Y_d = \sqrt{\frac{A_{ta} L_{ta}}{g A_c}} \cdot v \quad (3.90)$$

Considerando-se as perdas no sistema adutor:

$$Y_E = z_e Y_e \quad (3.91)$$

$$z_e = 1 - \frac{2}{3}k + \frac{1}{9}k^2 \quad (3.92)$$

$$k = \frac{h_{ta}}{Y_e} = \text{perda de carga relativa} \quad (3.93)$$

Onde,

$h_{ta}$  = perda de carga no sistema adutor, entre a tomada d'água e a chaminé, em m;  
com a perda de carga por atrito na tubulação  $h_a$  calculada para paredes lisas  $K_a = 0,32$  (Scobey) ou  $K_a = 100$  (Strickler).

Para o cálculo da depleção ( $Y_D$ ), é necessário verificar qual é o caso mais desfavorável entre as seguintes situações:

→ Depleção consecutiva à elevação máxima, decorrente do fechamento total (100%) da turbina;

→ Depleção decorrente da abertura parcial de 50% a 100% da turbina.

Para a primeira verificação, procede-se como descrito a seguir.

$$\text{Calcula-se } Y_D = z_d Y_d \quad (3.94)$$

O valor do coeficiente  $z_d$  é obtido da TABELA 3.1, apresentado a seguir, baseados nos gráficos de Calame e Gaden, entrando-se com o parâmetro:

$$k' = \frac{h'_{ta}}{Y_d} = \frac{h'_{ta}}{Y_e} \quad (3.95)$$

Onde,

$h'_{ta}$  = perda de carga no sistema adutor, entre a tomada d'água e a chaminé, em m, com a perda de carga por atrito na tubulação ( $h'_a$ ) calculada para paredes ásperas:

$K_a = 0,40$  (Scobey) ou  $K_a = 80$  (Strickler).

Para a segunda verificação, procede-se de maneira análoga:

$$Y_D = z_d Y_d \quad (3.96)$$

O valor do coeficiente  $z'_d$  é obtido da TABELA 3.2, em folhas a seguir, dos autores referidos, entrando-se com o parâmetro  $k'$ . A altura da chaminé de equilíbrio ( $H_c$ ) será determinada então por meio da seguinte expressão:

$$H_c = Y_e + y_E + (Y_D \text{ ou } Y'_D) + y_D + Y_R \quad (3.97)$$

Onde,

$y_E$  e  $y_D \cong 1,0 \text{ m}$  = acréscimo na altura da elevação e da depleção, por segurança;

$Y_R$  = depleção máxima do NA do reservatório, em m.

A FIGURA 3.7 representa os níveis calculados a serem representados na chaminé de equilíbrio de usinas a fio d'água. A FIGURA 3.8 representa os níveis calculados a serem representados na chaminé de equilíbrio de usinas com reservatório de regulação.

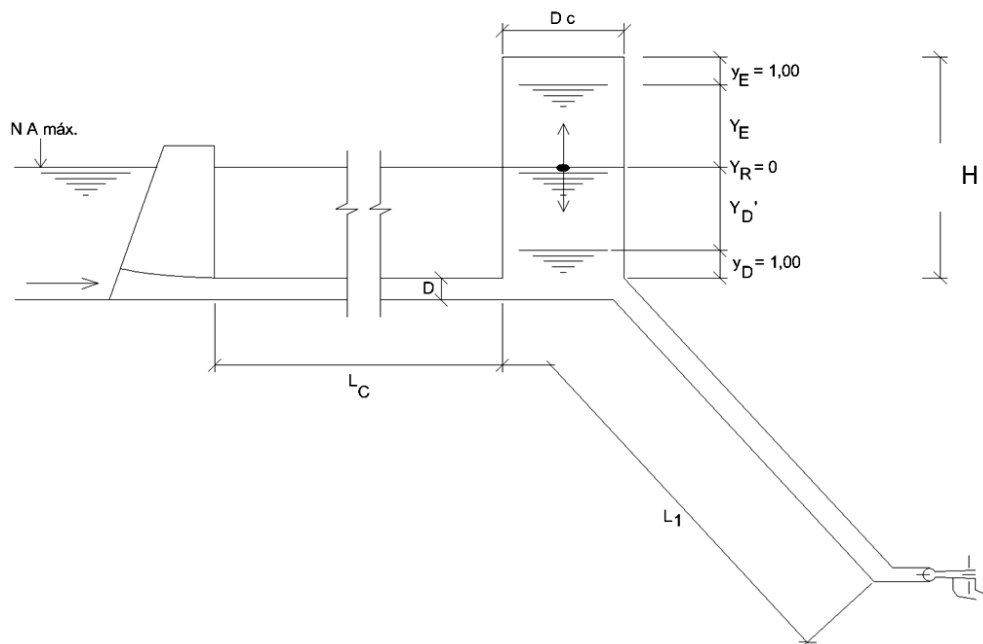


FIGURA 3.7 – Central a Fio d'Água (ELETROBRÁS, 2003).

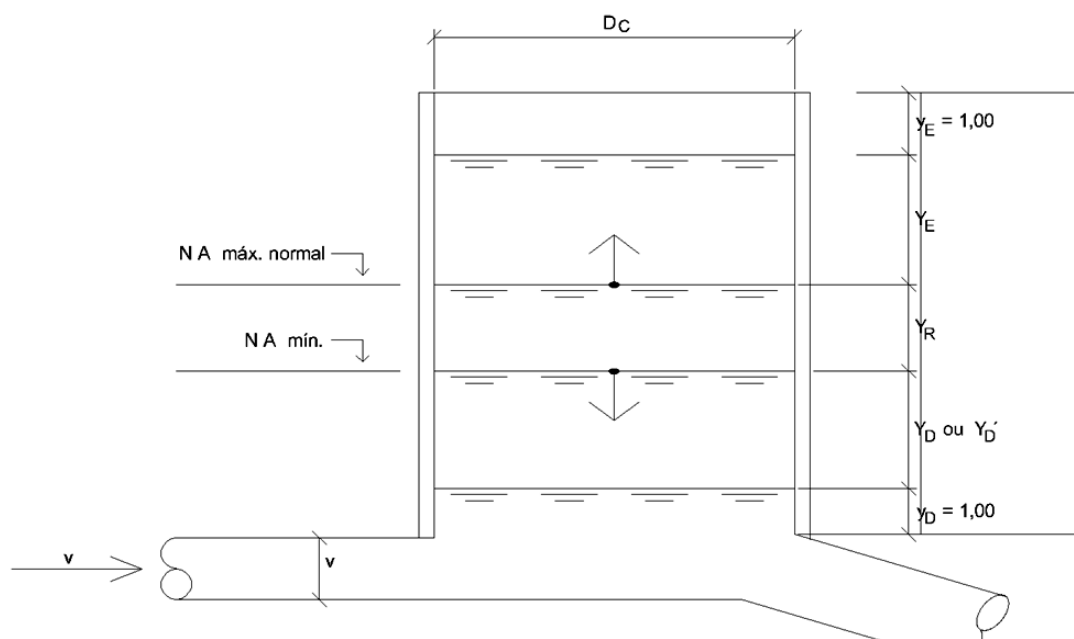


FIGURA 3.8 – Central com Reservatório (ELETROBRÁS, 2003).

As TABELAS 3.1 e 3.2 apresentam as constantes  $Z_d$  referentes à depleção consecutiva à elevação máxima e decorrente à uma abertura conseqüentemente.

TABELA 3.1 – Depleção Consecutiva à Elevação Máxima (ELETROBRÁS 2003).

k'	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,00	1,000	0,982	0,964	0,946	0,928	0,910	0,895	0,881	0,866	0,852
0,10	0,837	0,823	0,809	0,794	0,780	0,766	0,755	0,744	0,734	0,723
0,20	0,712	0,702	0,692	0,683	0,673	0,663	0,654	0,645	0,637	0,628
0,30	0,619	0,611	0,603	0,594	0,586	0,578	0,570	0,562	0,555	0,547
0,40	0,539	0,532	0,526	0,519	0,513	0,506	0,500	0,494	0,487	0,481
0,50	0,475	0,469	0,464	0,458	0,453	0,447	0,442	0,437	0,432	0,427
0,60	0,422	0,417	0,412	0,408	0,403	0,398	0,394	0,390	0,386	0,382
0,70	0,378	0,374	0,371	0,367	0,364	0,360	0,357	0,353	0,350	0,346
0,80	0,343	0,340	0,337	0,334	0,331	0,328	0,325	0,322	0,319	0,316
0,90	0,313	0,310	0,308	0,305	0,303	0,300	0,298	0,296	0,293	0,291
1,00	0,289	-	-	-	-	-	-	-	-	-

NOTA: Os valores de  $z_d$  constantes na tabela são negativos.

TABELA 3.2 – Depleção Decorrente à uma Abertura (ELETROBRÁS, 2003).

k'	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,00	0,500	0,504	0,507	0,511	0,514	0,518	0,522	0,525	0,529	0,532
0,10	0,536	0,540	0,544	0,548	0,552	0,556	0,560	0,564	0,569	0,573
0,20	0,577	0,581	0,585	0,589	0,593	0,597	0,601	0,605	0,610	0,614
0,30	0,618	0,622	0,627	0,631	0,636	0,640	0,644	0,649	0,653	0,658
0,40	0,662	0,666	0,671	0,675	0,680	0,684	0,689	0,693	0,698	0,702
0,50	0,707	0,711	0,716	0,720	0,725	0,729	0,734	0,739	0,744	0,749
0,60	0,754	0,759	0,764	0,770	0,775	0,780	0,786	0,791	0,797	0,802
0,70	0,808	0,814	0,819	0,825	0,830	0,836	0,842	0,848	0,854	0,860
0,80	0,866	0,872	0,878	0,885	0,891	0,897	0,904	0,910	0,917	0,923
0,90	0,930	0,937	0,944	0,952	0,959	0,966	0,973	0,980	0,986	0,993
1,00	1,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-

NOTA: Os valores de  $z_d^1$  constantes na tabela são negativos.

## 4 PROTÓTIPO DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

### 4.1 GERAL

O protótipo foi implementado no Laboratório Didático de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica da Universidade Federal do Paraná, anexo às instalações do Laboratório de hidráulica do LACTEC. Foi projetado com base em um modelo genérico de chaminé de equilíbrio utilizado na Universidade de Toronto no Canadá.

A principal vantagem do protótipo construído na UFPR consiste na possibilidade de implantar câmaras de expansão no topo e orifícios na base da chaminé de equilíbrio. Desta forma, também é possível simular a operação de dispositivos auxiliares no abrandamento das amplitudes de oscilação de água no interior da chaminé de equilíbrio, a partir da dispersão da energia pela perda de carga localizada imposta na entrada da chaminé e o aumento da área útil no local da instalação da câmara de expansão. Todavia, para esta pesquisa, não serão simulados orifícios, nem galerias superiores, em consequência, a análise será somente direcionada a chaminés simples.

A seguir descreve-se os componentes do protótipo:

a) Reservatório: é constituído de uma caixa d'água comum de cimento-amianto de 250 litros. A estabilidade do nível do reservatório (nível de montante) é garantida por uma estrutura vertente instalada em seu interior, que opera constantemente eliminando o excesso para um circuito de retorno. Por possuir soleira com dimensão bastante longa, levando em consideração as vazões ensaiadas, as variações do nível da lâmina d'água podem ser desprezíveis.

b) Conduto de Adução: a entrada do conduto é feita pelo fundo do reservatório e logo no seu início está instalada uma válvula de gaveta de latão (liga de cobre e zinco) com 1" de diâmetro, a jusante de uma curva vertical suave de 90° de 1". A entrada é simples efetuada com arestas vivas. O conduto de adução de ferro fundido galvanizado de 1" (medida interna observada de 27,7 mm) tem comprimento de total de 12,21 m. O conduto de adução é inclinado ao longo de quase todo seu comprimento. Na interseção entre o final do conduto inclinado e o início do conduto horizontal, está instalada uma mangueira de borracha que faz uma curva vertical suave. O conduto horizontal de montante da chaminé de equilíbrio também é de ferro galvanizado de 1" (27,7 mm) e possui 21 cm até a entrada da



chaminé de equilíbrio.

c) Chaminé de Equilíbrio: a entrada da chaminé de equilíbrio é feita a partir do conduto horizontal por um T flangeado de ferro galvanizado 1" para 2". Na entrada da chaminé de equilíbrio, já na parte acrílica, podem ser instalados orifícios quadrangulares de diferentes dimensões para simular chaminés com orifícios. A chaminé de equilíbrio foi construída em acrílico e possui seção quadrada com aresta interna medida em 4,47 cm totalizando  $\sim 20 \text{ cm}^2$  de área transversal útil. Da sua base até o topo da chaminé totaliza aproximadamente 2,75 m. Destes 2,75 m, 85 cm são acima do nível estático do reservatório de montante.

d) Dispositivos de jusante: após a passagem pela chaminé de equilíbrio, o conduto ainda se prolonga por mais aproximadamente 1,38 m até um dispositivo simples de cálculo de vazão. Neste trecho estão instaladas mais duas válvulas, duas curvas de 90° de 1" e outra curva de 45° no final. Uma válvula esférica a 30 cm a jusante da entrada da chaminé de equilíbrio, simula o rejeito de carga de fechamento rápido para a produção do golpe de aríete. A válvula de gaveta de latão, também de 1", está 1,08 cm a jusante da válvula de gaveta.

e) Reservatório de jusante: embora a descarga final do protótipo seja feita na pressão atmosférica, existe um reservatório de jusante para permitir calcular a vazão de operação. Possui dimensões conhecidas de 40 cm de diâmetro e cerca de 1,00 m de altura. A partir de um período conhecido pode ser medida a diferença entre níveis observados no início e no final do experimento, assim, descobrindo o volume acumulado e definindo a vazão.

Na FIGURA 4.1 apresenta-se uma seção longitudinal da chaminé utilizada neste trabalho.

As dimensões estão em metros, exceto onde indicado.

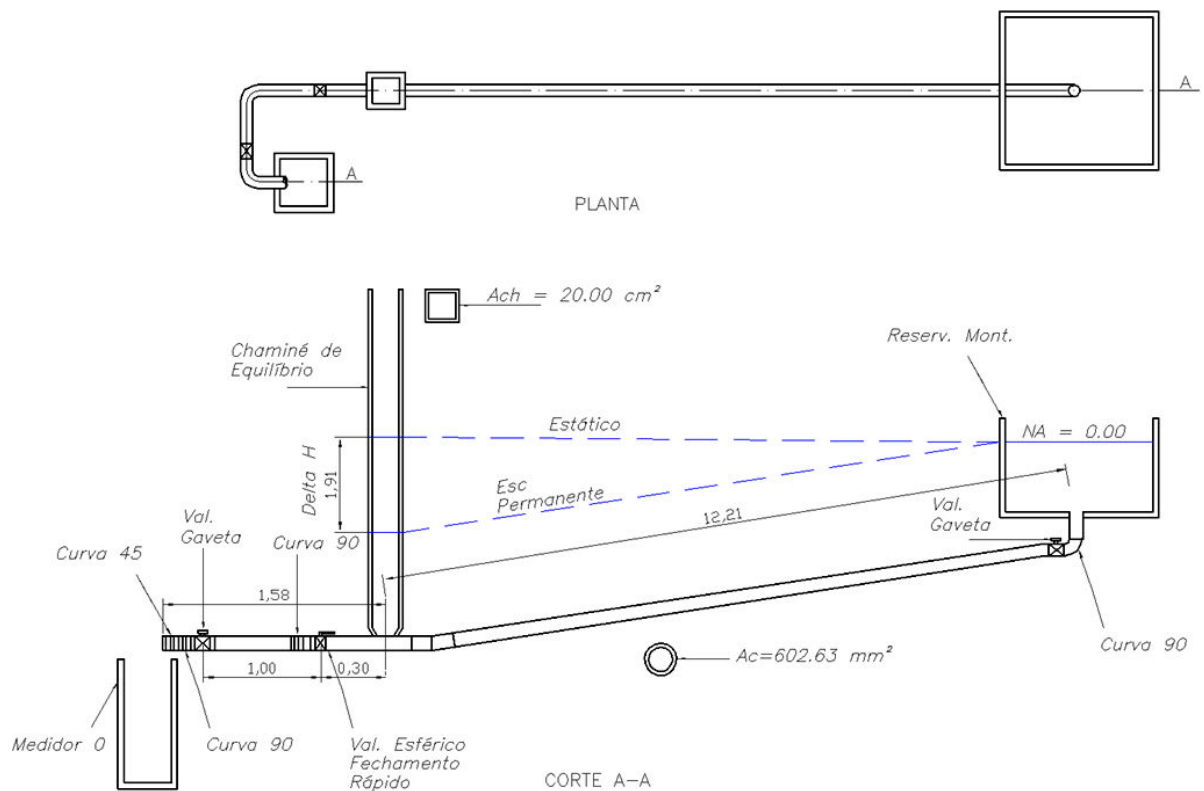


FIGURA 4.1 – Corte do Protótipo da Chaminé de Equilíbrio.

Na FIGURA 4.2 apresenta-se a foto da caixa de água que simula um reservatório de uma usina hidrelétrica a fio d'água. Possui em seu interior uma soleira vertente que descarrega o fluxo excedente da admissão de água e garante o nível do reservatório estático.



FIGURA 4.2 – Reservatório de Montante.

Na FIGURA 4.3 apresenta-se uma foto geral, capturada de jusante para montante, do conduto de adução instalado logo abaixo do reservatório. O tubo metálico inclinado sob pressão é apoiado em suportes de madeira engastados na parede.

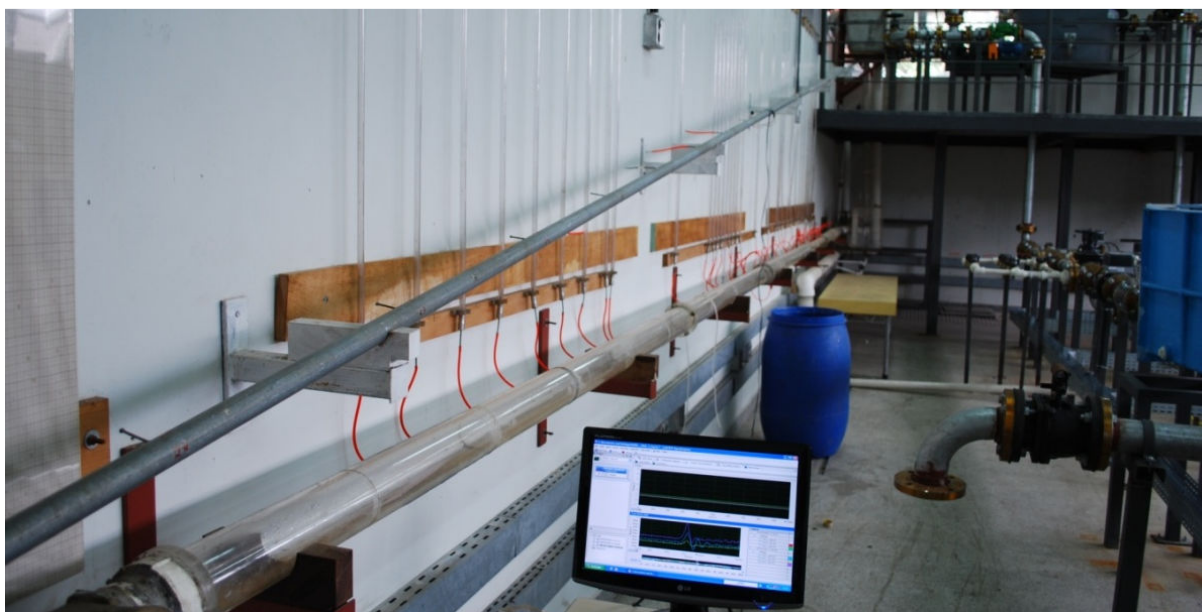


FIGURA 4.3 – Conduto de Adução.

Na FIGURA 4.4 apresenta-se a foto geral, da junção da chaminé de equilíbrio com o conduto de adução.



FIGURA 4.4 – Conduto de Adução e Chaminé de Equilíbrio.

Na FIGURA 4.5 apresenta-se a foto que mostra o dispositivo de jusante de medição de vazão simplificado, reservatório de jusante.



FIGURA 4.5 – Dispositivos de Jusante.

Na FIGURA 4.6 apresenta-se a foto onde mostra-se a válvula esférica manual responsável por produzir as aberturas rápidas ou os fechamentos rápidos para gerar os golpes de aríete.





FIGURA 4.6 – Dispositivos de Jusante e Válvula de Fechamento Rápido.

Na FIGURA 4.7 apresenta-se a foto onde mostra-se o local de instalação do sensor para monitoramento das oscilações de nível de água e pressões instantâneas da chaminé de equilíbrio.

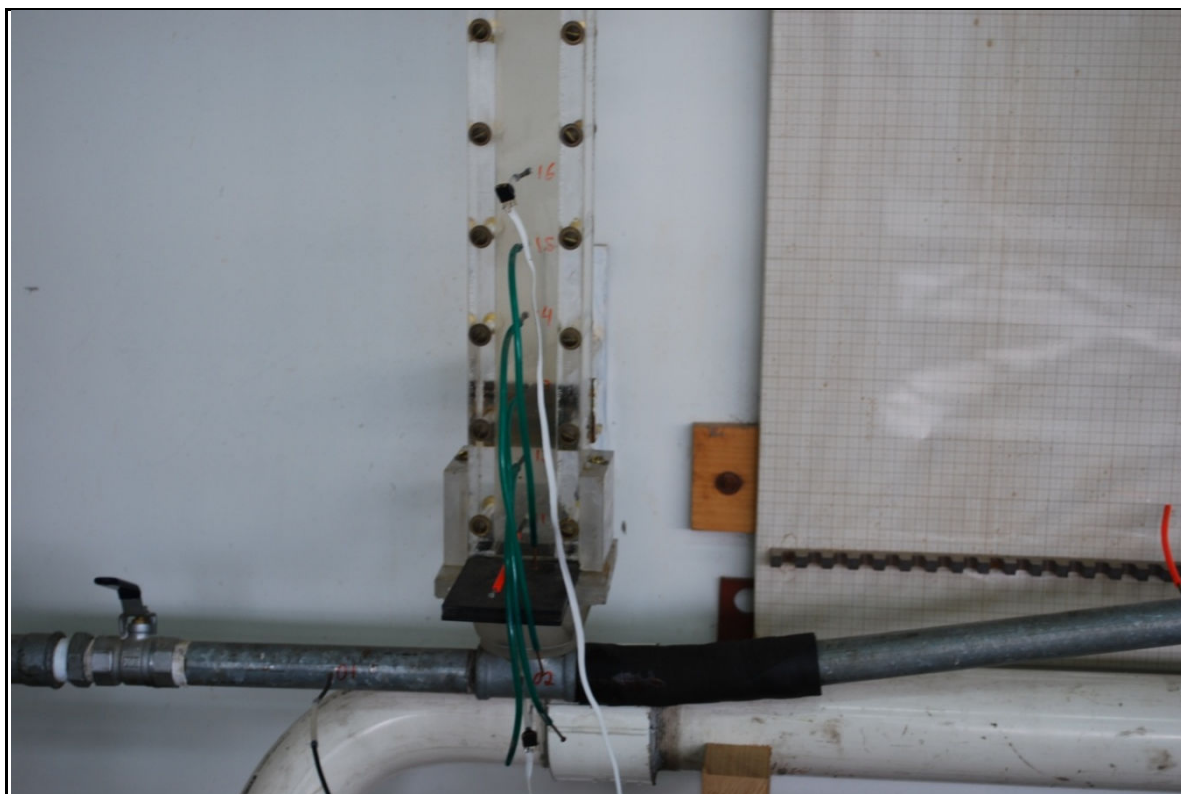


FIGURA 4.7 – Local de instalação do Sensor da Chaminé de Equilíbrio.

Na FIGURA 4.8 apresenta-se a foto do detalhe do transdutor de pressão.

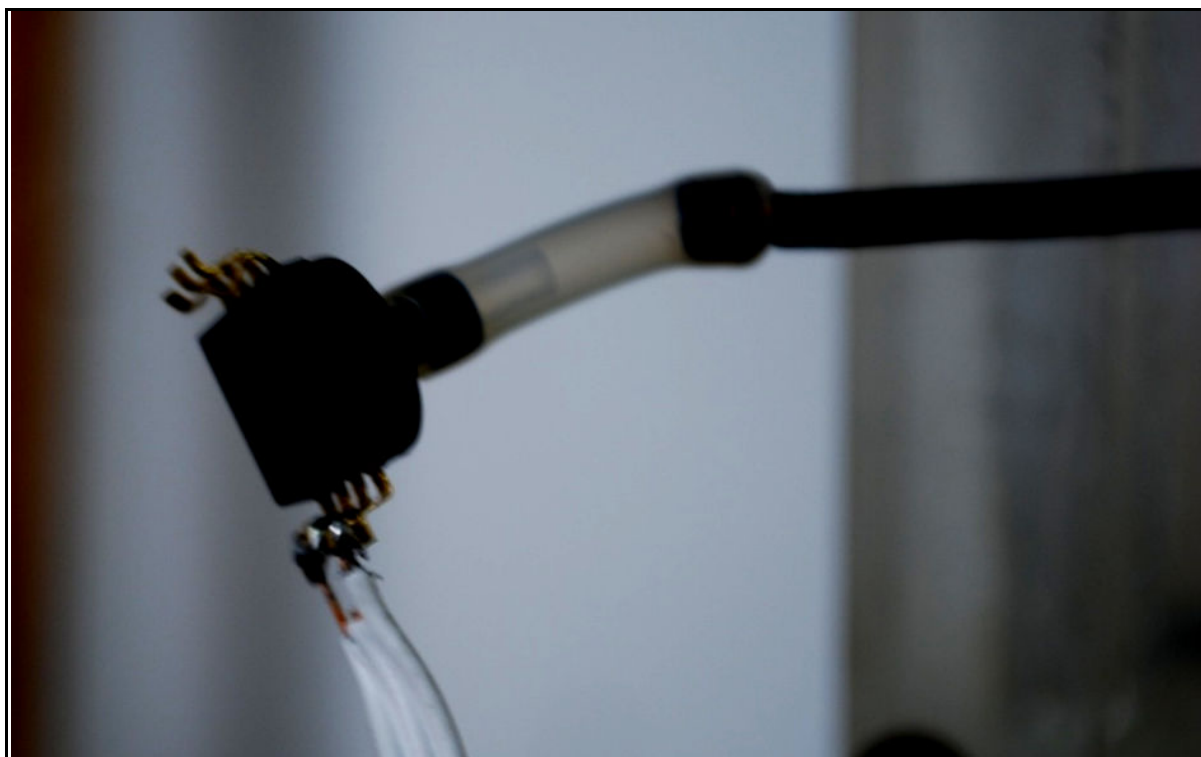


FIGURA 4.8 – Detalhe do Dispositivo Transdutor de Pressão.

## 4.2 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Para o estudo dos transientes hidráulicos no protótipo da chaminé de equilíbrio foi necessária a instalação de equipamentos capazes de registrar todo o fenômeno das oscilações de pressões.

Para o estudo, desenvolveu-se em caráter de pesquisa científica uma plataforma de monitoramento para estudar o fenômeno de oscilação de pressões causado pelo golpe de aríete ao longo do circuito hidráulico. Esta etapa foi essencial para estudar a maneira com que seriam adquiridos os dados.

Os componentes considerados são os seguintes:

Sensor: são capazes de registrar tomadas de pressão com alta precisão. Os sensores são da marca Freescale, modelo MPXV5100, e podem produzir medidas na ordem de mm.c.a, e pode ser instalado ao longo do protótipo: chaminé de equilíbrio, conduto de adução e de jusante, conforme a necessidade de monitoramento das seções. Há um transdutor de pressão que além de transferir a energia mecânica (pressão) em pulsos elétricos, otimiza os dados em função da pressão atmosférica e da temperatura ambiente do momento. Este transdutor transforma as variações de pressão sentidas pelo sensor em impulsos elétricos na ordem de milivolts. A calibração dos sensores é apresentada nas equações (4.1) e (4.2) (HOFFMANN 2008).

*Datalogger*: É um instrumento que possui uma interface direta com o *software* instalado no computador. Após o teste as leituras de pressão obtidas em seu próprio sensor eletrônico são transmitidas e plotadas na interface pelo *software* LABVIEW.

Aproveitando a possibilidade de monitoramento da plataforma foram instalados no protótipo dois sensores de pressão localizados em locais segundo a seguinte descrição:

Sensor A: localizado no interior da chaminé de equilíbrio a uma distância de 45 cm do eixo do conduto, segundo mostra a FIGURA 4.9;

Sensor B: localizado no conduto a 5,00 m a montante da chaminé de equilíbrio, segundo mostra a FIGURA 4.9.

Para o objetivo principal deste trabalho, basta analisar o sensor A, para se obter a resposta dinâmica da oscilação de massa.

Cada sensor teve que ser calibrado para a faixa adequada de resultados esperados e seguem relações diferentes entre as respostas transmitidas pelo LABVIEW, na ordem de volt. A seguir apresentam-se as equações de correlação ambos sensores.

Para o Sensor A:

$$p = 2,292833.U + 0.494056 \quad (4.1)$$

Onde,

$p$  = pressão, em m.c.a;

$U$  = tensão, em Volt;

Para o Sensor B:

$$p = 2.274532.U + 0.429405 \quad (4.2)$$

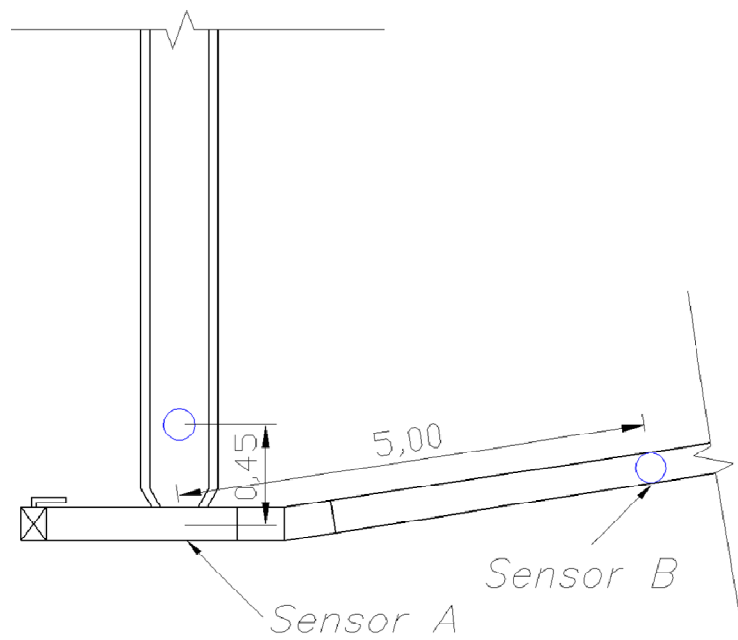


FIGURA 4.9 – Local de Instalação dos Sensores “A” e “B”.



## 5 SIMULAÇÕES

### 5.1 MODELO DA ACELERAÇÃO DA MASSA DE ÁGUA NO CONDUTO DE ADUÇÃO

A seguir as simulações obtidas pelo método de diferenças finitas de sistema EDO (equações diferenciais ordinárias) da oscilação da massa no interior da chaminé de equilíbrio são apresentadas. Os APÊNDICES 1 e 2 apresentam a planilha com detalhes de cálculos do EDO1 e EDO 2, respectivamente.

A primeira simulação levou em consideração as características do projeto executivo do protótipo em estudo. Foram processadas informações considerando o estudo da primeira série de testes da plataforma instalada no protótipo da chaminé de equilíbrio (HOFFMAN, 2008). A segunda considerou as medidas das estruturas do protótipo obtidas por paquímetro e trena métrica.

a) EDO1 - Nesta etapa foram simulados dados das características da chaminé de equilíbrio segundo o projeto de construção do protótipo: com vazão de 0,6754 l/s, comprimento do conduto em 12 m, área da chaminé de 20 cm<sup>2</sup>. Para a calibração do modelo regulo-se o coeficiente de perda de carga conforme perda de 1,91 m na seção da chaminé, diâmetro efetivo do tubo em 25 mm, adotou-se fechamento rápido em 0,2 s e o mesmo tempo para a abertura. A FIGURA 5.1 descreve os dados de entrada na simulação EDO1 e as FIGURAS 5.2 e 5.3 apresenta os resultados referentes à simulação EDO1.

Nível do reservatório de montante	$Z_0 =$	0.00	m
Vazão máxima de projeto	$Q_0 =$	0.0006754	m <sup>3</sup> /s
Área do Túnel	$A =$	0.0004909	m <sup>2</sup>
Comp. característico (se S const.)	$L =$	12	m
Tempo de fechamento da válvula	$t_f =$	0.2	s
Raio hidráulico do conduto	$R_h =$	0.00625	m
Área da chaminé de equilíbrio	$A_c =$	0.0020	m <sup>2</sup>
Fator de perda de carga: contínuo $f(\text{material})$	$Z' =$	0.04103	
$f$ de perda : perdas localizadas	$Z'' =$	0	
$E$ : fator de estrangulamento da chaminé	$Z''' =$	1	100.00%
Tempo de abertura da válvula	$t_a =$	0.2	s
Período de integração	$T_i =$	0.1	s
Aceleração da gravidade	$g =$	9.81	m/s <sup>2</sup>

FIGURA 5.1 – Dados de Entrada na Simulação EDO1

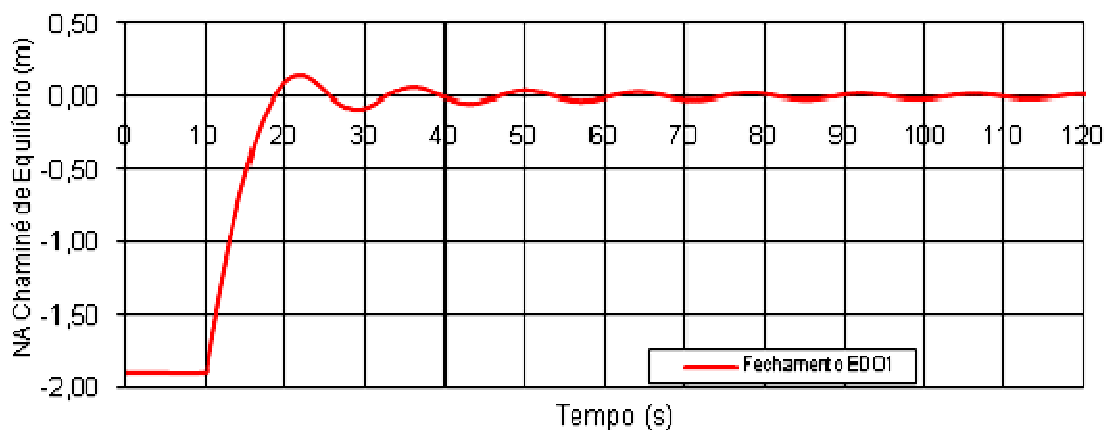


FIGURA 5.2 – Resultado da Simulação EDO1 – Caso Fechamento

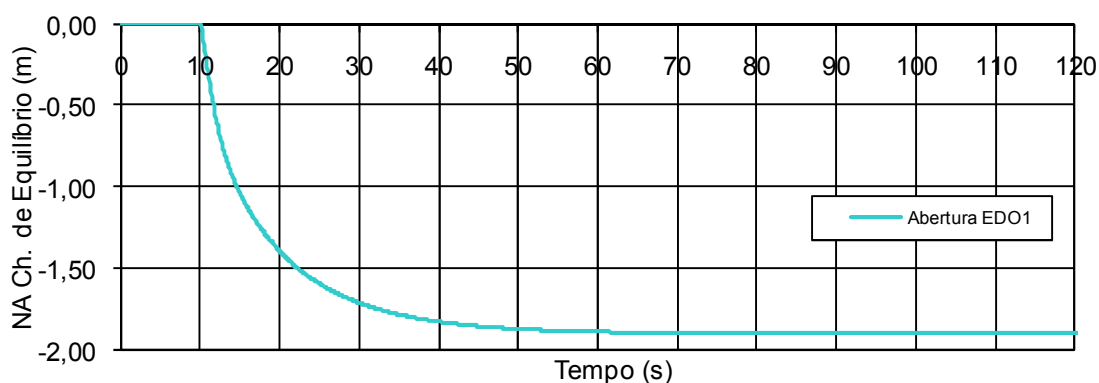


FIGURA 5.3 – Resultado da Simulação EDO1 – Caso Abertura

b) EDO2 - Nesta etapa foram adotadas as características geométricas da chaminé de equilíbrio medidas *in loco*, através de paquímetro e trena. Nesta etapa, foram efetuadas 3 (três) medições de vazões utilizando o tambor de jusante. Das três, duas com o tempo de 1 minuto e outra com o tempo de 73 segundos. Avaliou-se a vazão real: a vazão média medida foi de 0,964 l/s. O comprimento do conduto é da ordem de 12,21 m. Foi regulado o coeficiente de perda de carga conforme perda observada de 1,91 na seção da chaminé. O diâmetro efetivo do tubo foi de 27,7 mm, e adotou-se fechamento rápido em 0,2 segundos e idem para a abertura.

A FIGURA 5.4 descreve aos dados de entrada da simulação EDO2 e as FIGURAS 5.5 e 5.6 apresentam os resultados referentes à simulação EDO2.

Nível do reservatório de montante	$Z_0 =$	0.00	m
Vazão máxima de projeto	$Q_0 =$	0.000964	m <sup>3</sup> /s
Área do Túnel	$A =$	0.0006026	m <sup>2</sup>
Comp. característico (se S const.)	$L =$	12.21	m
Tempo de fechamento da válvula	$t_f =$	0.2	(s) *
Raio hidráulico do conduto	$R_h =$	0.0069250	m
Área da chaminé de equilíbrio	$A_c =$	0.0019981	m <sup>2</sup>
Fator de perda de carga: contínuo f(material)	$Z' =$	0.03322	
f de perda : perdas localizadas	$Z'' =$	0	
E : fator de estrangulamento da chaminé	$Z''' =$	1	100.00%
Tempo de abertura da válvula	$t_a =$	0.2	(s) *
Período de integração	$T_i =$	0.1	s
Aceleração da gravidade	$g =$	9.81	m/s <sup>2</sup>

FIGURA 5.4 – Dados de Entrada na Simulação EDO2

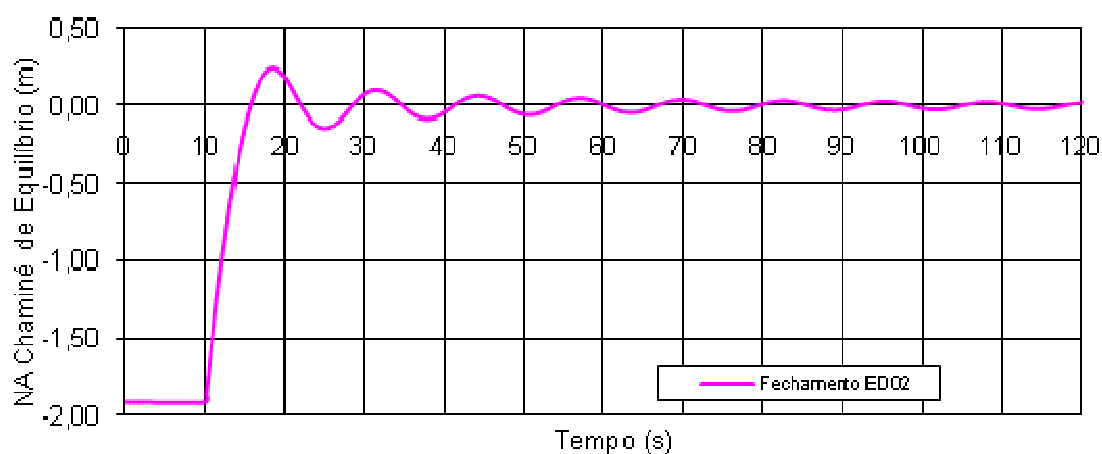


FIGURA 5.5 – Resultado da Simulação EDO2 – Caso Fechamento

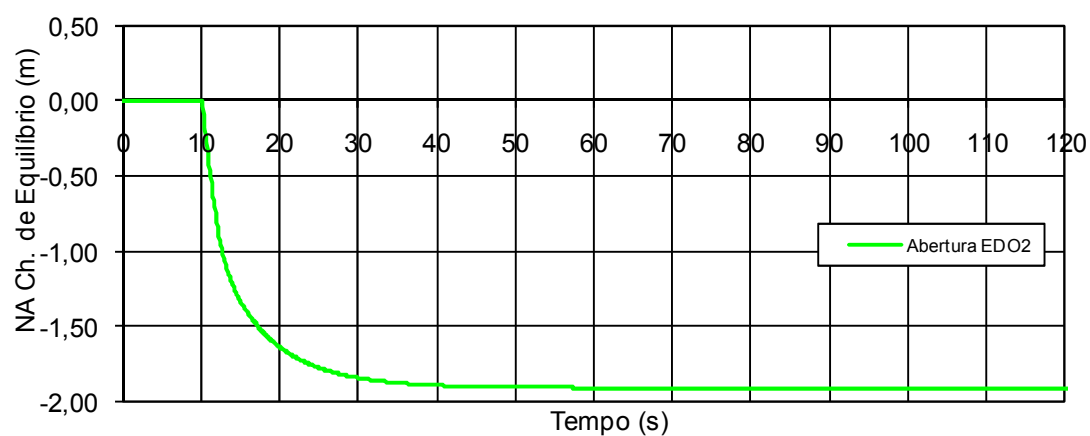


FIGURA 5.6 – Resultado da Simulação EDO2 – Caso Abertura

## 5.2 MODELO WANDA

O programa WANDA 3 foi preparado para atender as características físicas observadas em laboratório com os dados de entrada igual aos da simulação EDO2, mas com algumas alterações devido às particularidades de tratamento do programa. Em ambos os casos, de fechamento e abertura rápida, foi necessário calibrar a rugosidade absoluta do conduto forçado e os coeficientes de operação da válvula para considerar a mesma perda de carga do escoamento permanente, 1,91 m na seção da chaminé, vazão e o tratamento do fenômeno transitório conforme outros métodos.

As simulações realizadas como o programa WANDA podem ser tratadas conforme duas hipóteses: admitindo a coluna de água rígida, ou adotando a coluna de água elástica (maleável). Nessa segunda hipótese, leva-se em consideração a resistência dos materiais, como módulo de Young do conduto, coeficientes de viscosidade e densidade da água.

### 5.2.1 Coluna de Água Rígida - CR

A análise “CR” consiste em considerar a água como um corpo rígido (sólido) através do modelo de Allievi. A vazão média do regime permanente adotada foi de aproximadamente 0,964 l/s. O comprimento do conduto adotado foi de 12,21 m. O coeficiente de perda de carga foi adotado conforme perda observada de 1,91 m, e o diâmetro efetivo do tubo de 27,7 mm. Adotou-se um fechamento rápido em 0,2 segundos e idem para a abertura. Foi adotada a área da chaminé de equilíbrio como sendo 0,0019981 m<sup>2</sup>.

A interface do programa Wanda é apresentada no APÊNDICE 3, com as respectivas características do circuito e as condições de contorno. A FIGURA 5.7 apresenta o resultado obtido da situação de fechamento rápido da válvula em 0,2 s. A FIGURA 5.8 apresenta o resultado obtido da situação de abertura rápida da válvula em 0,2 s.

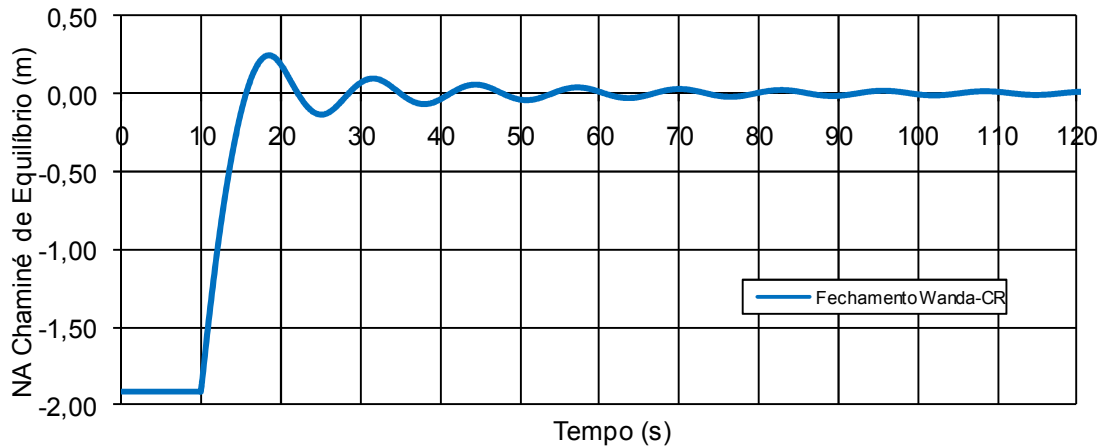


FIGURA 5.7 – Resultado da Simulação WMC-01-CR – Caso Fechamento

No caso da abertura não foi possível simular a manobra da válvula a partir de uma vazão nula para o instante inicial. Neste caso considerou-se a vazão mínima inicial admitida pelo programa como  $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . Com isto, foi necessário fazer uma pequena alteração na rugosidade absoluta do conduto forçado e nos coeficientes de operação da válvula para obter a mesma perda de carga do escoamento permanente, em 1,91 m e simular o mesmo fechamento.

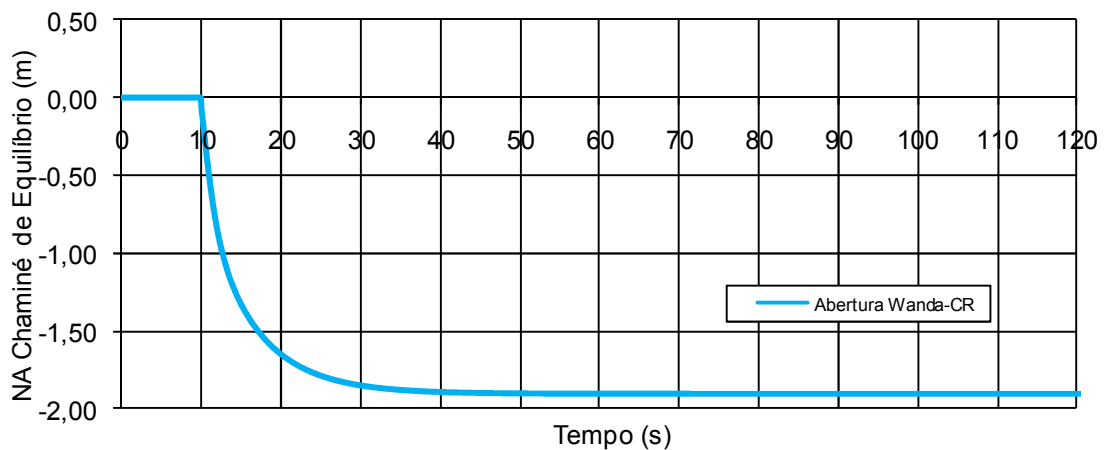


FIGURA 5.8 – Resultado da Simulação WMC-01-CR – Caso Abertura

### 5.2.2 Coluna de Água Elástica - CM

A análise “CM” (coluna maleável) considera a água como elástica e parte do princípio que a seção do conduto forçado pode variar conforme o golpe de aríete gerado pela operação da válvula. A vazão média adotada é a mesma do tópico

anterior, 0,9064 l/s. O comprimento do conduto forçado é de 12,21 m, e mesmo coeficiente de perda de carga conforme perda observada de 1,91 m, diâmetro efetivo do conduto de 27,7 mm, e adotou-se fechamento rápido em 0,2 segundos e mesmo tempo para a abertura. A área da chaminé de equilíbrio determinada em 0,0019981 m<sup>2</sup>.

Em pesquisa a diferentes referências foram relacionados inúmeros tipos e estados do ferro e seu módulo de elasticidade. Observou-se que os ferros fundidos galvanizados empregados nas tubulações hidráulicas têm módulo de elasticidade que podem variar significativamente dependendo da pureza dos elementos do composto do material e grau de oxidação. Como não foi possível definir com precisão adotou-se aqui 160 GPa para esta análise. Foi medido no protótipo através de paquímetro a espessura média da parede do conduto resultando em 2,6 mm.

A FIGURA 5.9 apresenta o resultado obtido da situação de fechamento rápido da válvula em 0,2 s calculada pelo WANDA 3. A FIGURA 5.10 apresenta o resultado obtido da situação de abertura rápida da válvula em 0,2 s.

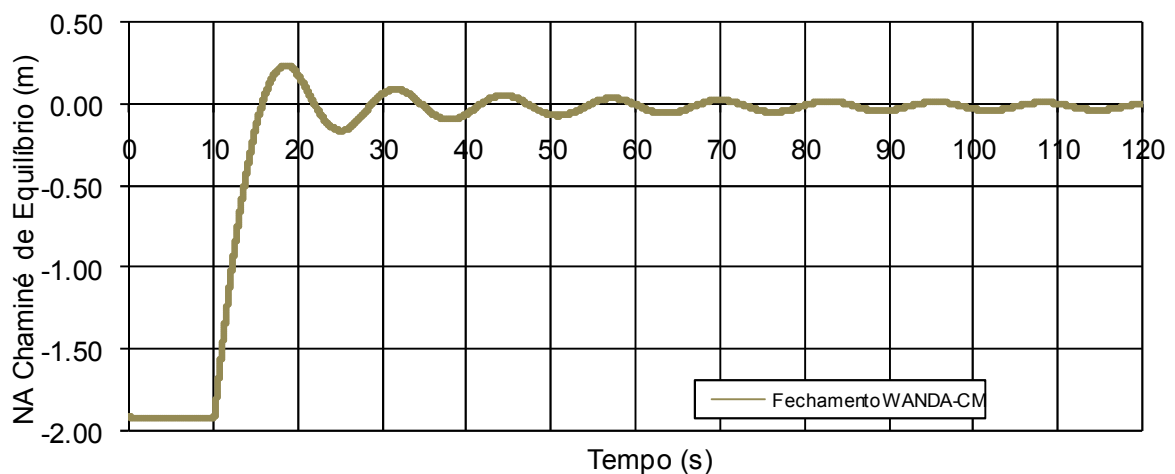


FIGURA 5.9 – Resultado da Simulação WMC-01-CM – Caso Fechamento

Novamente, no caso da abertura, não foi possível simular a manobra da válvula a partir de uma vazão nula no instante inicial. Neste caso considerou-se a vazão mínima inicial admitida pelo programa para um circuito  $1 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s. Com isto, foi necessário fazer uma pequena alteração na rugosidade absoluta do conduto

forçado e nos coeficientes de operação da válvula para obter a mesma perda de carga do escoamento permanente, em 1,91 m e simular o mesmo fechamento.

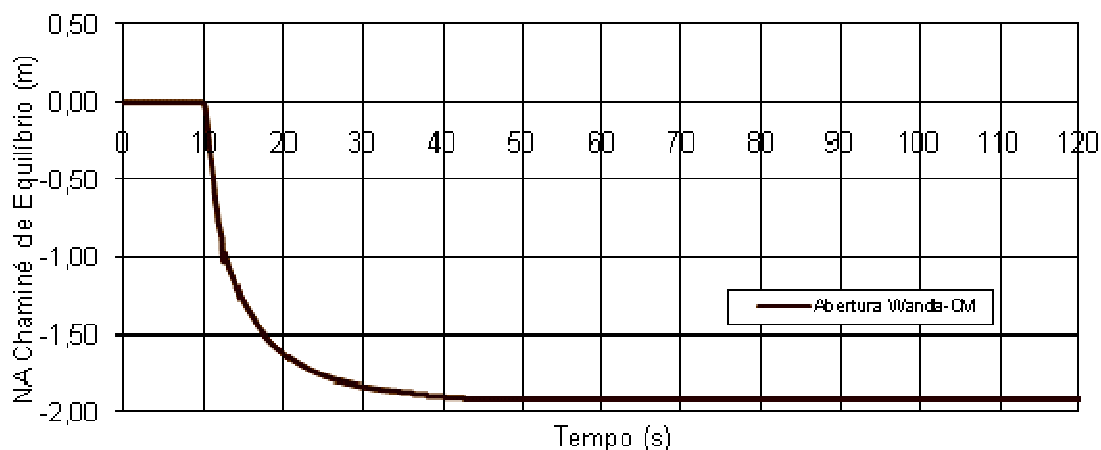


FIGURA 5.10 – Resultado da Simulação WMC-01-CM – Caso Abertura

### 5.3 MODELOS DE DIFERENÇAS FINITAS

#### 5.3.1 Método Difusivo de Lax

Desenvolveu-se as rotinas de cálculo em *Turbo Pascal* para resolver as equações diferenciais do escoamento em condutos pelo método difusivo de Lax.

O programa foi preparado para atender as características observadas conforme a estrutura do protótipo. Nos cálculos particulares deste programa foram considerados coeficientes de perdas de cargas localizadas nas entradas do conduto e da chaminé de equilíbrio de 0,50. Neste caso necessitou-se regular novamente o coeficiente de perda de carga distribuída no conduto para resultar uma perda total de 1,91 m quando do escoamento permanente. Foi adotado o fator de atrito como 0,031.

Para os demais dados de entradas como vazão, tempo de manobra da válvula, característica da estrutura, foram adotados os valores usados outros métodos.

No APÊNDICE 4 encontram-se as listagem dos programas com os dados de entrada, variáveis e toda a descrição da rotina de cálculo para o caso do fechamento e abertura.

Nas FIGURAS 5.11 e 5.12 apresentam-se os resultados referentes às simulações obtidas com o método difusivo de Lax.

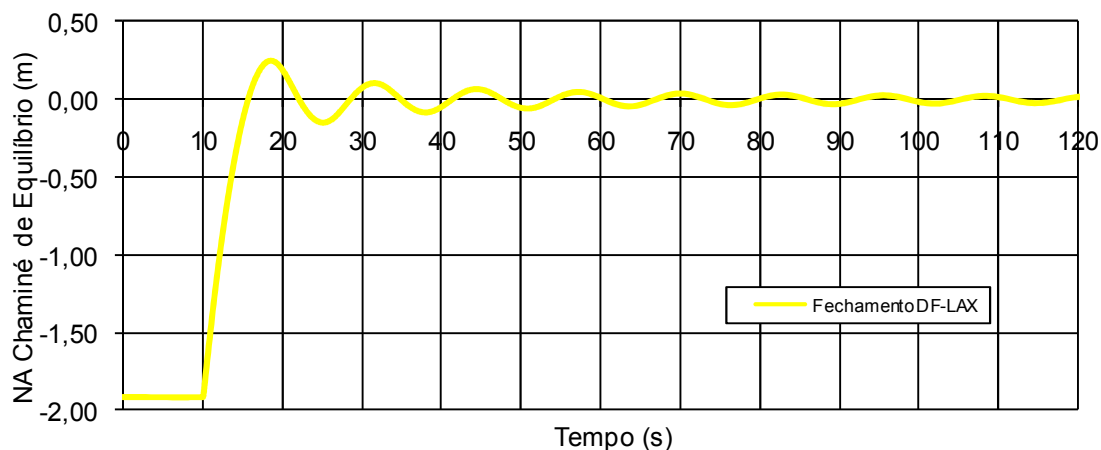


FIGURA 5.11 – Resultado da Simulação DF-LAX – Caso Fechamento

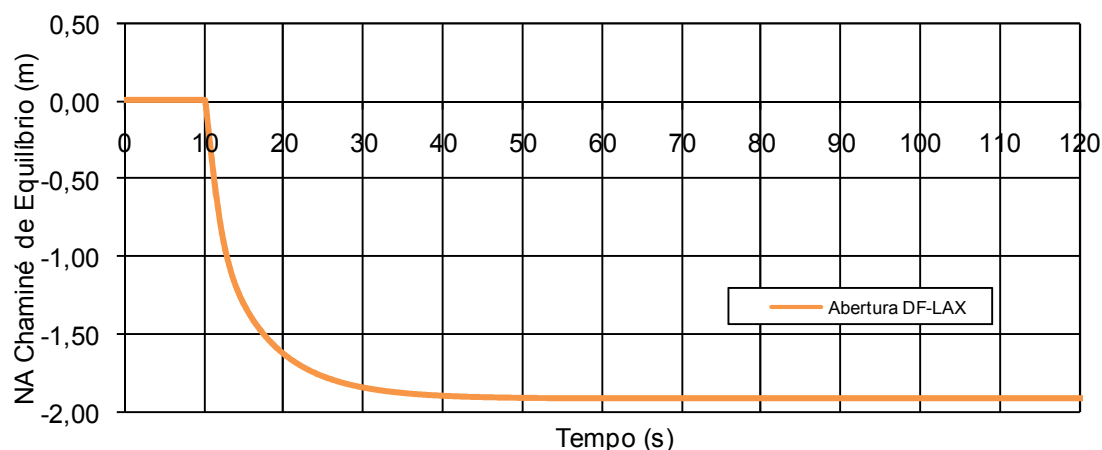


FIGURA 5.12 – Resultado da Simulação DF-LAX – Caso Abertura

### 5.3.2 Esquema de Diferenças finitas linearizado de Preissmann

O esquema linearizado de Preissmann foi implementado computacionalmente em *Turbo Pascal* por meio de um objeto denominado de ENPC de Kaviski e Franco (1997), cuja estrutura apresenta-se na FIGURA 5.12.



---

```

const
nst = 10;
ndx = 2000;
type
vet1 = array[1..nst] of double;
vet2 = array[0..ndx] of double;

enpc = object
l,d,a,f,ac,
alfa          : vet1;
n,s           : integer;
dx            : double;
dh,dq,h,q,
ep,fp,lp,mp,np : ^vet2;
hp,bp,cp,dp,gp : array[1..2] of ^vet2;
ck            : array[1..12] of vet1;
constructor   alocmem;
destructor    librmem;
procedure     ctes;
procedure     param;
procedure     dupvarr;
end;

```

---

FIGURA 5.12 - Estrutura do objeto ENPC (KAVISKI e FRANCO,1997).

No objeto ENPC estão incluídos os parâmetros identificadores de cada ramo da rede em vetores com os elementos, representando os trechos: comprimento (l), diâmetro (d), área do conduto (a), resistência ao escoamento (f) celeridade (ac) e o ângulo do eixo do conduto (alfa).

Estão incluídos em vetores com n elementos os coeficientes necessários para a aplicação do método da dupla-varredura (ep, fp, lp, mp, np, hp, bp, cp, dp e gp) e as variáveis dependentes (h, q, dh e dq). Os 12 coeficientes ck representam algumas constantes auxiliares, para cada trecho do ramo do conduto.

No objeto ENPC estão incluídos um método construtor e um destrutor para alocação e deslocação das variáveis dinâmicas. Estão incluídos 3 procedimentos: ctes, para determinação dos coeficientes ck; param, para inicialização dos coeficientes usados para aplicação do método de diferenças finitas; e dupvarr, que soluciona o sistema de equações pelo método da dupla-varredura.

Nesta dissertação empregou-se o objeto ENPC para solucionar o estudo de caso do protótipo, onde considerou-se a chaminé de equilíbrio como um contorno

interior (LIGGETT e CUNGE, 1975), com o objetivo de solucionar o problema de fechamento de válvula. Entretanto, este método falhou na obtenção de resultados satisfatórios.

O sistema de equações constituído pelo esquema linearizado de Preissmann, após as primeiras iterações, apresentou resultados instáveis, mesmo respeitando-se a condição de estabilidade de Courant, que deve ser considerada no caso de esquemas de diferenças finitas explícitos. Analisando-se os resultados obtidos, concluiu-se que a instabilidade está relacionada com o método da Dupla-varredura, usado para solucionar o sistema de equações lineares, em cada intervalo de tempo.

O método da Dupla-varredura é muito eficiente para solucionar sistemas de equações dispersos (quadradiagonais) de grande dimensões (maiores do que 1.000 equações), quando não existe a necessidade de efetuar a escolha de pivô. Geralmente nestas situações pode-se empregar o método de eliminação de Gauss com pivotamento total ou métodos iterativos. O uso destes métodos para a obtenção de resultados pelo esquema de discretização linearizado de Preissmann tornam esta solução pouco competitiva em relação aos esquemas de diferenças finitas explícitos, que solucionam o sistema de equações diferenciais sem a necessidade de linearização.

#### 5.4 CRITÉRIOS DA ELETROBRÁS/PCHs

Foram aplicados os métodos sugeridos nas bibliografias da Eletrobrás: Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2003) e Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2000). Foram definidas as características do fluxo, a sobrepressão e subpressão máximas, e os níveis máximo e mínimo de oscilação da massa de água no interior da chaminé de equilíbrio, segundo a característica da estrutura do protótipo.

Os dados de entrada foram os mesmos que os adotados anteriormente no item 5, simulados no caso “EDO2”. Trata-se dos dados das características da chaminé de equilíbrio medidas no laboratório, através de paquímetro e trena.

São os seguintes os resultados obtidos:

a) Primeiro critério da Canambra.

A verificação da necessidade da instalação da chaminé de equilíbrio é realizado, preliminarmente, em nível de estudo de inventário partindo do critério de Canambra:

$$\frac{L_{cf}}{H_b} \leq 5 \text{ (PCHs)} \text{ ou } \frac{L_{cf}}{H_b} \leq 4 \text{ (Canambra)} \quad \frac{12,21}{\sim 2,75} = 4,44 \leq 5 \text{ (pouco maior que 4)}$$

Conclusão: se faz necessária a instalação de chaminé de equilíbrio.

b) Constante de Aceleração.

Verifica-se, também, a indicação de inclusão de uma chaminé de equilíbrio considerando a constante de aceleração do escoamento no conduto forçado, como apresentado a seguir. A constante de aceleração do escoamento no conduto forçado guarda uma relação com a constante de aceleração do grupo turbina-gerador, que deve satisfazer, igualmente, os critérios de sobrepressão máxima admissível.

$$t_h = \frac{v_{cf} L_{cf}}{g H_b} \quad v_{cf} = \frac{Q}{A} = \frac{0,000964}{0,0006026} = 1,60 \text{ m/s}$$

$$t_h = \frac{1,60 \cdot 12,21}{9,81 \cdot 2,75} = 0,072 \text{ s}$$

Para  $t_h < 3,0$  segundos, não há necessidade de instalação da chaminé. Para valores entre 3,0 segundos e 6,0 segundos a instalação é desejável, mas não obrigatória. Para  $t_h < 6,0$  segundos, é obrigatória a instalação da chaminé.

Conclusão: não se faz necessária a instalação da chaminé de equilíbrio.

c) Fórmula de Michaud

Sugerida pelo manual de critérios da Eletrobrás (2003) a estimativa de Michaud determina a magnitude da sobrepressão instantânea máxima resultante do golpe de aríete, que é função do tempo da manobra de fechamento da válvula.

$$\Delta h = \frac{2VL}{gT_e} = \frac{2 \cdot 1,60 \cdot 12,21}{9,81 \cdot 0,2} = 19,91m$$

Uma sobrepressão 7,2 vezes a pressão estática ocorre para um fechamento de 0,2 segundos. Com a inclusão da variável velocidade do fluxo do conduto, a análise pelo segundo critério de Canambra é:

$$L.v < 25.H \quad 12,21 \cdot 1,60 < 25 \cdot 2,75 \quad 19,54 < 68,75$$

Conclusão: não se faz necessária a instalação da chaminé de equilíbrio.

#### d) Condição de Sparre e de Thoma

Para garantir a reflexão e propiciar uma proteção satisfatória ao conduto de adução, correlacionam-se as dimensões do conduto forçado com a da chaminé de equilíbrio. Segundo Sparre:

$$A_{ch} > A_c \quad 20 \text{ cm}^2 > 2,7 \text{ cm}^2$$

Conclusão: a área da chaminé é satisfatória.

Segundo Thoma:

$$A_{ch} > A_{Th} \quad A_{Th} = \frac{v^2}{2.g} \cdot \frac{A_{ch} \cdot L}{h \cdot (H - h)} = \frac{1,60^2}{19,62} \cdot \frac{0,001998112 \cdot 21}{1,91 \cdot (2,75 - 1,91)} \approx 0,002m^2$$

$$\sim 0,02 \text{ m}^2 > \sim 0,002 \text{ m}^2$$

Conclusão: a área da chaminé é satisfatória e possui grande margem de segurança por ser 10 vezes maior que a área de Thoma.

#### e) Definição dos níveis de água máximo e mínimo

Trata-se da definição através de critérios para PCHs apresentados pela Eletrobrás para definir níveis críticos que a água pode alcançar na coluna da chaminé de equilíbrio. Primeiramente pode ser estudada a elevação máxima ( $Y_E$ ) definida para o nível de água máximo do reservatório e posteriormente a depleção ( $Y_D$ ) do nível de água mínimo do reservatório.

Com uma pequena alteração na formula de  $Y_E$  da publicação oficial da Eletrobrás, obtém-se os valores representativos do protótipo.

Com base no protótipo considerado, a análise das oscilações dos níveis é realizada conforme a FIGURA 3.7 (equivalente a uma usina a fio d'água).

$$Y_E = z_e Y_e = \sqrt{\frac{A_{ta} L_{ta}}{g A_c}} \cdot v \quad z_e = 1 - \frac{2}{3} k + \frac{1}{9} k^2 \quad k = \frac{h_{ta}}{Y_e} = \frac{1,91}{Y_e}$$

$$z_e = 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{1,91}{Y_e} + \frac{1}{9} \left( \frac{1,91}{Y_e} \right)^2$$

$$\left[ 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{1,91}{Y_e} + \frac{1}{9} \left( \frac{1,91}{Y_e} \right)^2 \right] Y_e = \sqrt{\frac{A_{ta} L_{ta}}{g A_c}} \cdot v = \sqrt{\frac{0,0006026 \cdot 12,21}{9,81 \cdot 0,0019981}} \cdot 1,60 \therefore Y_e = 2,056m$$

$$k = \frac{h_{ta}}{Y_e} = \frac{1,91}{2,06} = 0,93 \therefore z_e = 1 - \frac{2}{3} k + \frac{1}{9} k^2 = 0,477$$

$$Y_E = z_e Y_e = 0,477 \cdot 2,056 = 0,98m$$

Conclusão: a oscilação máxima para um fechamento instantâneo que pode ocorrer na chaminé de equilíbrio do protótipo é 98 cm acima do nível de água do reservatório. Para a determinação da depleção máxima consideram-se duas hipóteses: depleção consecutiva à elevação máxima decorrente do fechamento total rápido da turbina, ou válvula ( $Y'_D$ ); e a depleção decorrente da abertura parcial da metade para a total ( $Y''_D$ ).

$$Y_D = z'_d Y_d \quad k' = \frac{h'_{ta}}{Y_d} = \frac{h'_{ta}}{Y_e} = \frac{1,91}{2,06} = 0,93$$

Portanto, da FIGURA 3.9 com o parâmetro  $k' = 0,93$ , obtém-se:

$$z'_d = 0,305$$

$$Y'_D = z'_d Y'_d = -0,305 \cdot 2,056 = -0,627m$$

Com o parâmetro  $k' = 0,93$  obtém-se da FIGURA 3.10,

$$z''_d = 0,952$$

$$Y''_D = z''_d Y'_d = -0,952 \cdot 2,056 = -1,957m$$

Considera-se o valor absoluto para a depleção máxima,  $Y''_D = -1,96 m$ , ou seja, pode ocorrer numa manobra instantânea uma oscilação de até 5 cm abaixo do nível de água, do escoamento permanente. A FIGURA 5.13 ilustra os limites das oscilações previstas segundo o método de cálculo preconizado pela Eletrobrás para pequenas centrais hidrelétricas.

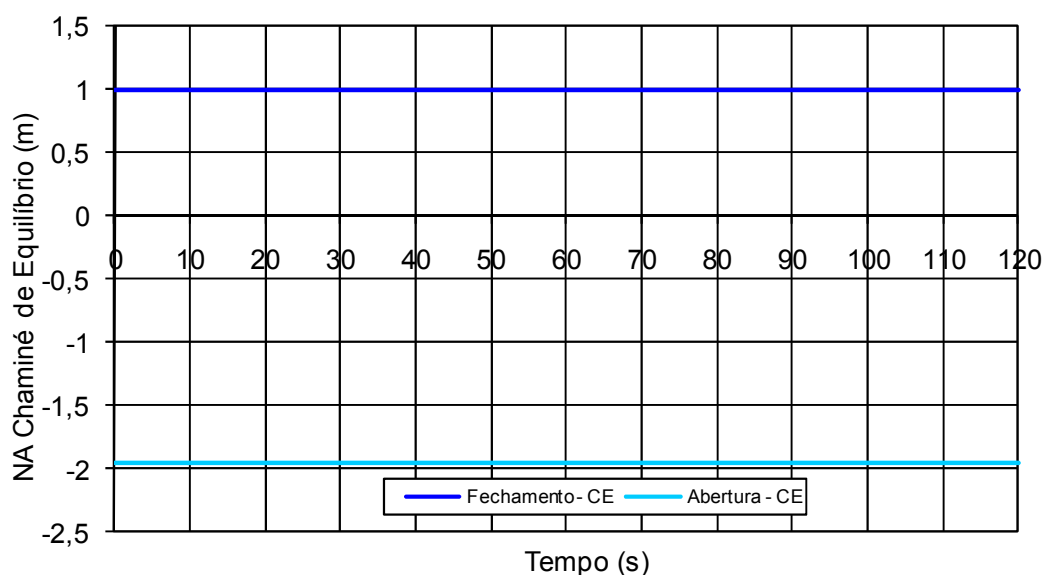


FIGURA 5.13 – Resultado dos Critérios da Eletrobrás - Fechamento e Abertura

## 5.5 SIMULAÇÕES REALIZADAS NO PROTÓTIPO

Foram simulados 3 fechamentos e 3 aberturas totais e “instantâneas” da válvula. Destas simulações foi extraída a média aritmética como forma de obter uma única resposta de operação da válvula.

As FIGURAS 5.14 e 5.15 representam a oscilação de água obtida pelo sensor de pressão instalado no interior da chaminé de equilíbrio chamado de sensor “A”. A FIGURA 5.14 refere-se ao fechamento. A FIGURA 5.15 é referente à abertura da válvula.

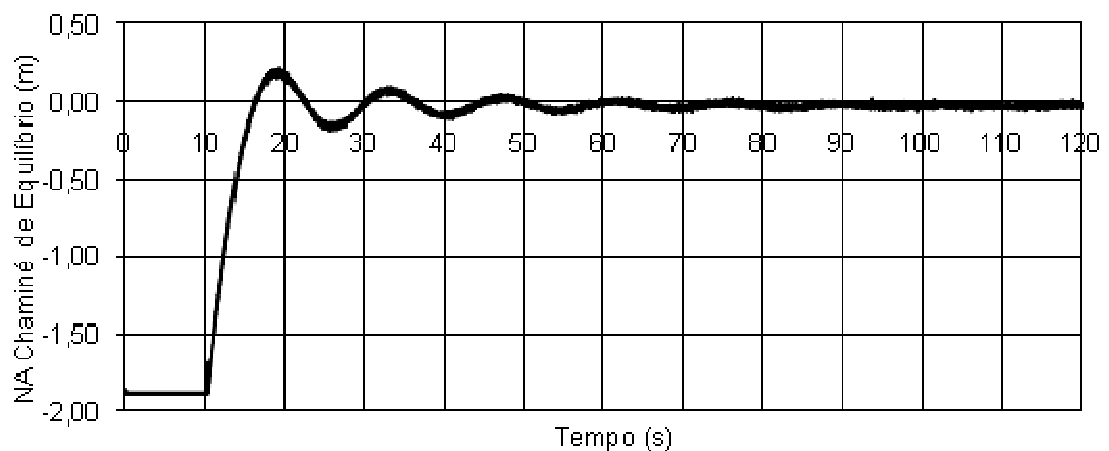


FIGURA 5.14 – Resultado dos Ensaio no Protótipo – Caso Fechamento

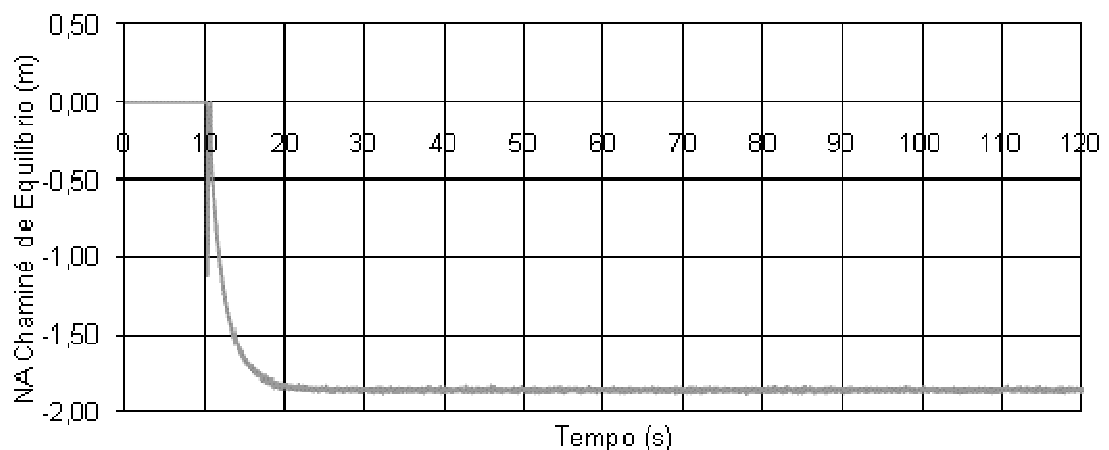


FIGURA 5.15 – Resultado dos Ensaio no Protótipo – Caso Abertura

## 6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 RESUMO DOS RESULTADOS

A FIGURA 6.1 é referente à simulação de fechamento rápido e a FIGURA 6.2 é referente à simulação de abertura, que apresentam os resultados de todos os métodos pré-definidos para a comparação das oscilações no tempo.

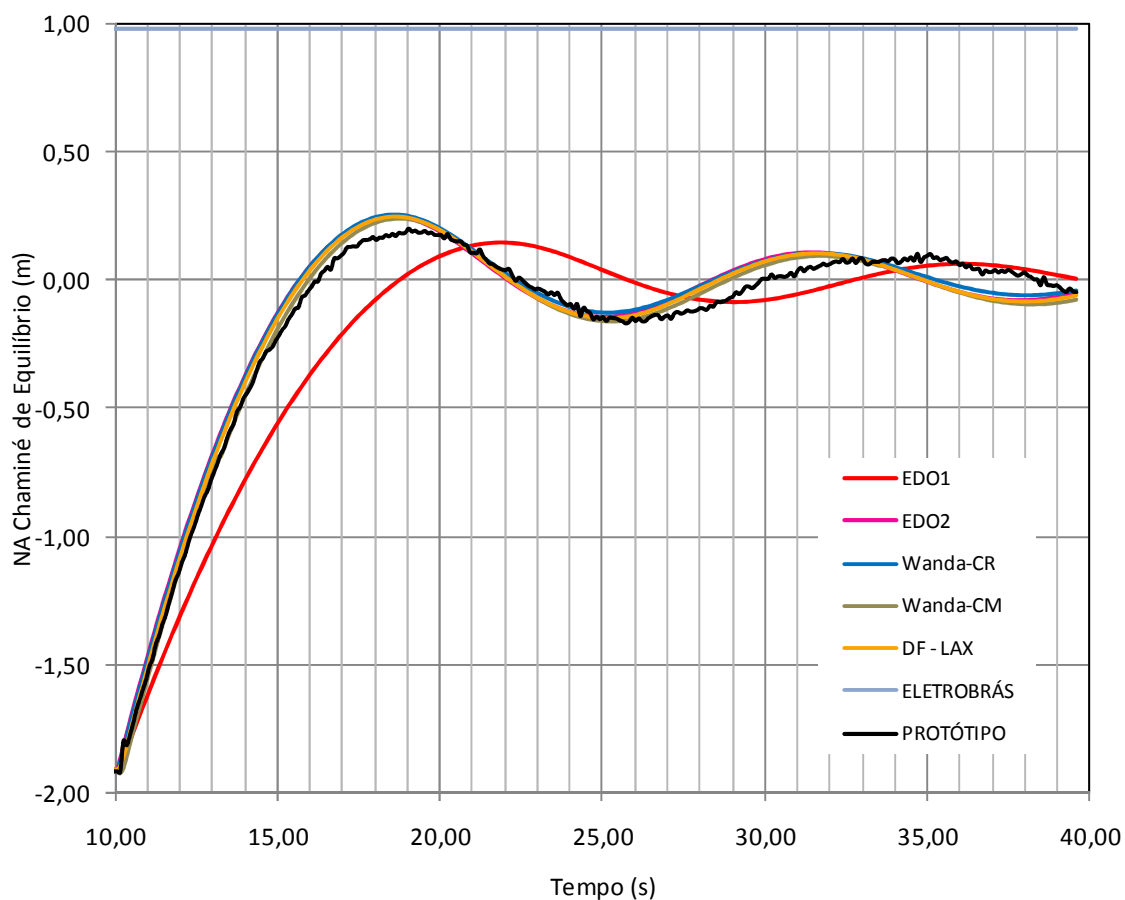


FIGURA 6.1 – Resultado das Simulações – Caso Fechamento

O APÊNDICE 5 apresenta uma planilha com os resultados numéricos das oscilações de água para cada simulação.



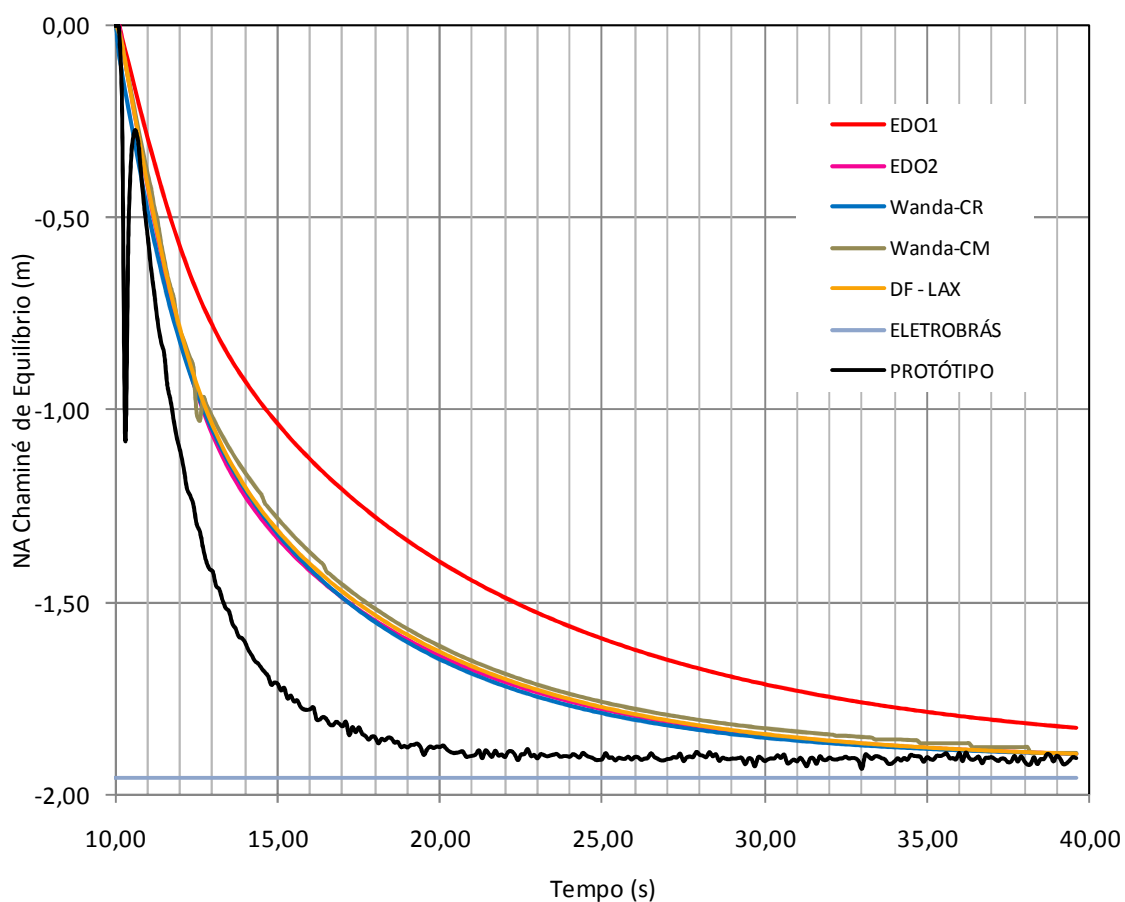


FIGURA 6.2 – Resultado das Simulações – Caso Abertura

A precisão esperada nos resultados das medições e dos cálculos matemáticos é da ordem de 1 cm em função das aproximações numéricas adotadas. O que equivale a aproximadamente 0,5 % da amplitude das oscilações observadas no protótipo.

## 6.2 EDO1 x EDO2 x PROTÓTIPO

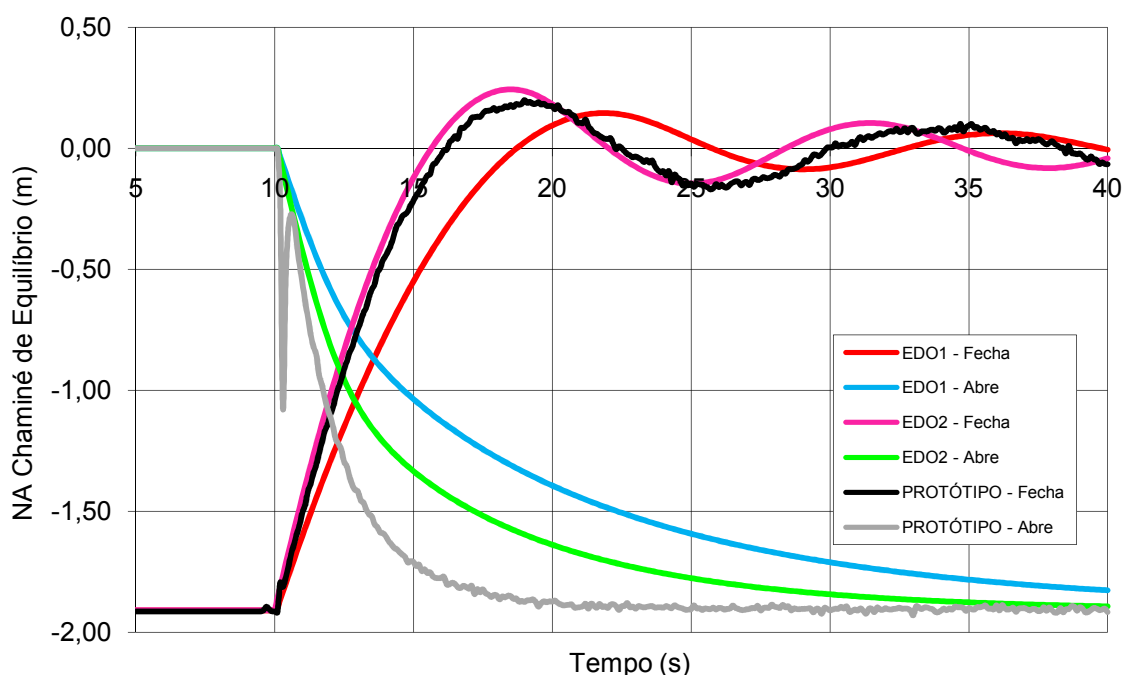


FIGURA 6.3 – Comparação EDO1xEDO2xPROTÓTIPO – Caso Fechamento e Abertura

Observando os resultados de EDO1 e EDO2 na FIGURA 6.3, e comparando com o resultado do protótipo conclui-se que EDO2 mais se aproxima do protótipo, portanto os dados de entrada da EDO2 são mais compatíveis com as características do protótipo. Confirma-se que o cálculo de oscilação dos níveis de água em chaminé de equilíbrio será tão mais realístico quanto mais próxima da realidade forem os dados. Pequenas variações de comprimento do conduto/túnel, lei de manobra na válvula, rugosidade da parede do conduto/túnel e as áreas dos elementos chaminé/conduto/túnel alteram toda a análise. Na implicação destas constatações, conclui-se que é de extrema validade estudar novamente os transientes após a construção de um circuito de geração, considerando os dados observados em obra, por causa das possíveis sobrecavações dos túneis, rugosidades variáveis e curvas não previstas em condutos.

Na simulação EDO1 obteve-se resultados de oscilações inferiores em relação ao protótipo, e no resultado do EDO2 obteve-se resultados de oscilações superiores em relação ao protótipo. Assim, percebe-se que é possível descobrir novos parâmetros de entrada para gerar oscilações próximas às do protótipo. As FIGURAS 6.4 e 6.5 referem-se a nova simulação EDO3 para nova análise.

Nível do reservatório de montante	$Z_0 =$	0.00	m
Vazão máxima de projeto	$Q_0 =$	0.0009	m <sup>3</sup> /s
Área do Túnel	$A =$	0.0005940	m <sup>2</sup>
Comp. característico (se S const.)	$L =$	12.21	m
Tempo de fechamento da válvula	$t_f =$	0.2	(s) *
Raio hidráulico do conduto	$R_h =$	0.0068750	m
Área da chaminé de equilíbrio	$A_c =$	0.0019981	m <sup>2</sup>
Fator de perda de carga: contínuo f(material)	$Z' =$	0.037	
f de perda : perdas localizadas	$Z'' =$	0	
E : fator de estrangulamento da chaminé	$Z''' =$	1	100.00%
Tempo de abertura da válvula	$t_a =$	0.2	(s) *
Período de integração	$T_i =$	0.1	s
Aceleração da gravidade	$g =$	9.81	m/s <sup>2</sup>

FIGURA 6.4 – Dados de Entrada na Simulação EDO3

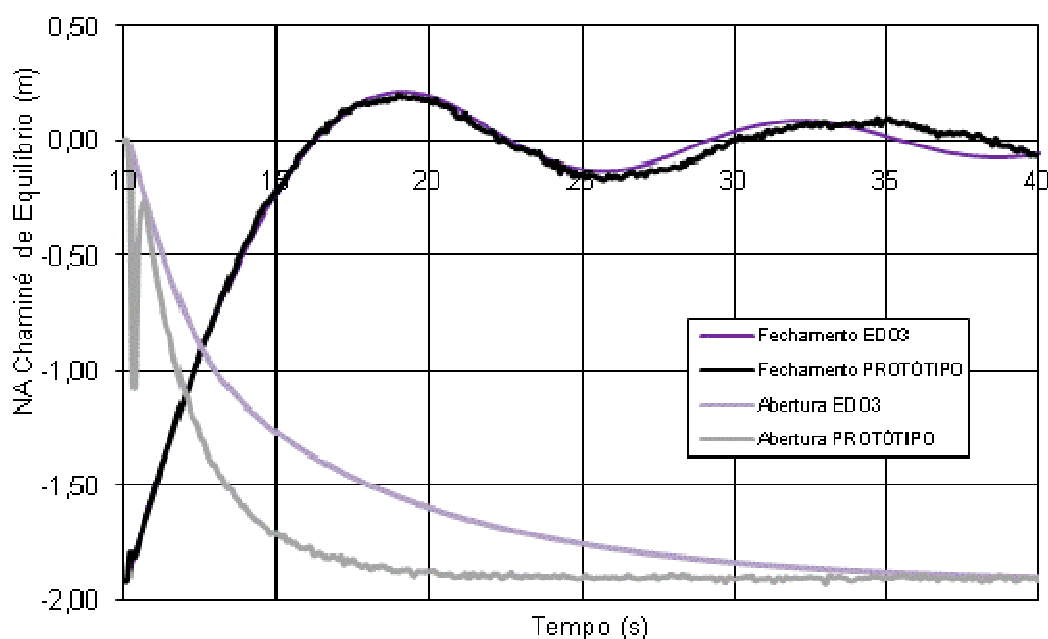


FIGURA 6.5 – Comparação DF-EDOXPROTÓTIPO – Caso Fechamento e Abertura

Observando os dados de entrada, para o caso do fechamento, poderia ser concluído que as medidas levantadas do protótipo, vazão do escoamento permanente e a rugosidade previamente adotadas estariam erradas. Mas conforme Amaral e Palmier (2006), os métodos que fazem um tratamento específico para o fator de atrito do transiente apresentam um amortecimento maior nos casos estudados. Portanto, sabe-se que a taxa de dissipação, para os métodos que

envolvem coeficientes de perdas de carga de escoamentos permanentes, e admitem a coluna de água rígida, é mais branda. Por esta constatação, a simulação EDO2 continua sendo a mais realística das três EDOs.

### 6.3 WANDA-CR x WANDA-CM

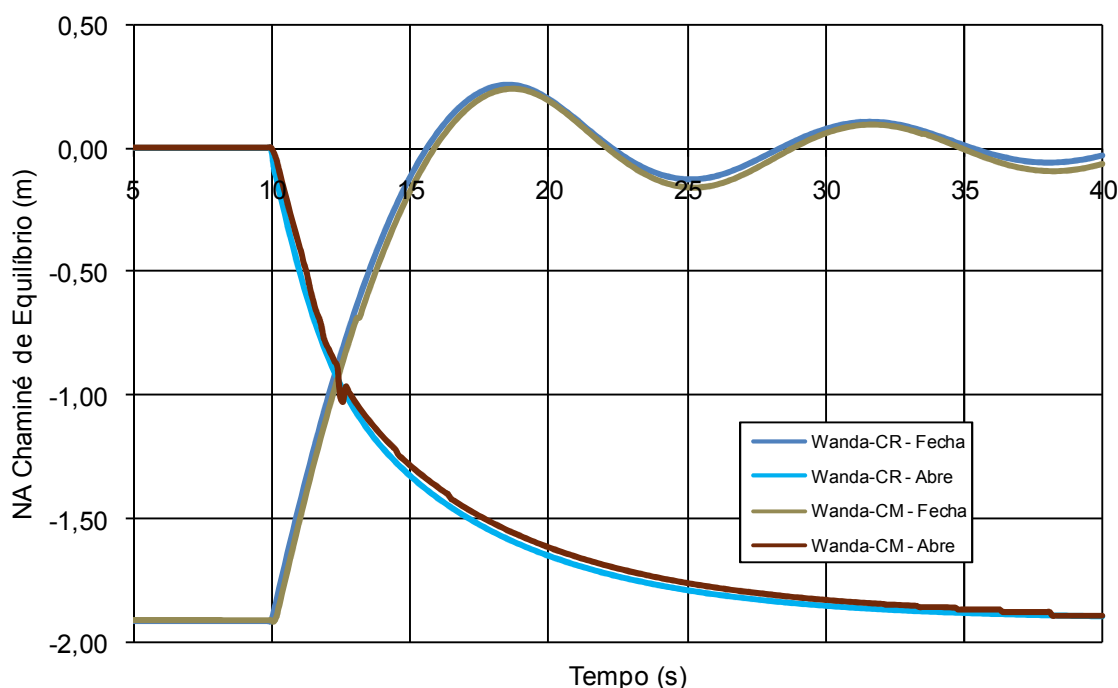


FIGURA 6.6 – Comparação WANDA-CRxWANDA-CM – Caso Fechamento e Abertura

A FIGURA 6.6 mostra pouca variação entre os resultados da simulação por “CR” e “CM”. A diferença da forma matemática de resolução é simplesmente o fator  $1/c_f^2$  da equação da continuidade, sendo que  $c_f$  obtido nos cálculos foi, aproximadamente, 1.300 m/s. O coeficiente multiplicado pela taxa de variação da carga piezométrica pelo tempo é um número que pode ser considerado muito pequeno, calcula-se na ordem de  $10^{-7}$ .

Para este fator ser determinante, em relação ao cálculo considerando a coluna de água rígida, a parcela  $\frac{\partial H}{\partial t}$  terá que ser mais representativa, ou seja, mais brusca, o que não ocorre no caso do protótipo analisado. Possivelmente em condutos muito longos, ou seja, quando a relação área/comprimento do conduto for

grande, ou mesmo em redes complexas de tubulações de materiais com módulos de elasticidade baixos, o fator que considera a coluna elástica seja substancial.

Além disto, nos casos de sistemas mais sensíveis, podem ocorrer casos onde os limites de operação são maiores e a análise da quebra de coluna de água ou do rompimento da tubulação torna-se essencial.

A variação observada é mínima mas mostra que, para o caso, da coluna de água elástica, as oscilações geradas são mais brandas em relação à coluna de água rígida.

#### 6.4 ELETROBRÁS x PROTÓTIPO

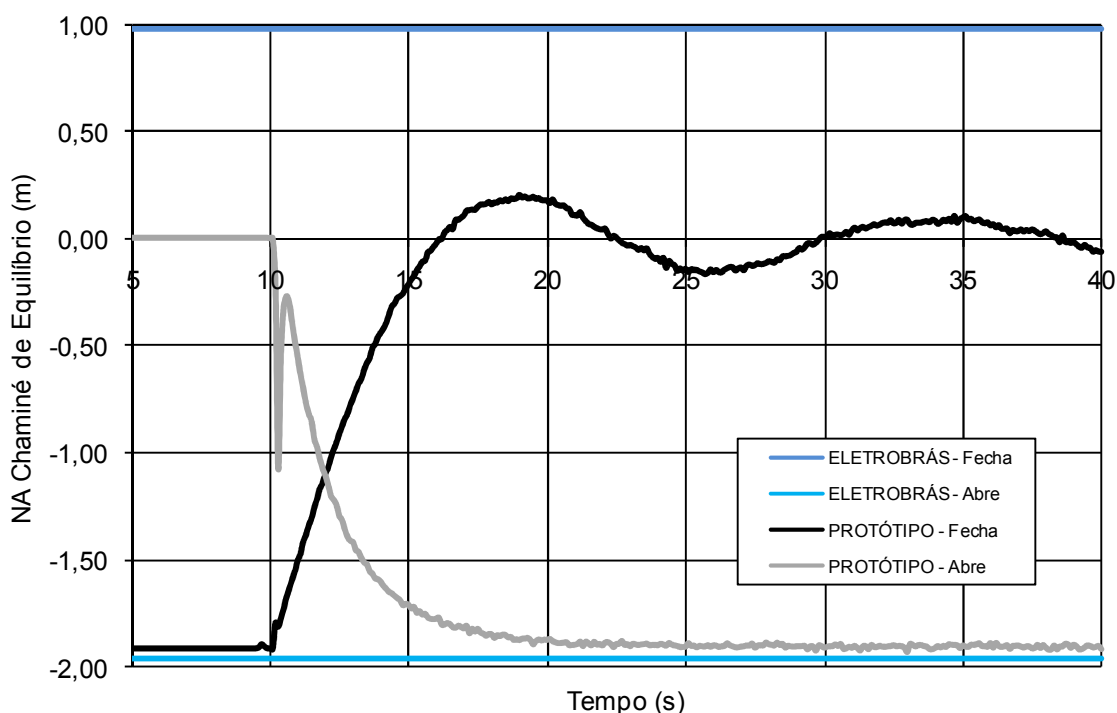


FIGURA 6.7 – Comparação ELETROBRÁSxPROTÓTIPO – Caso Fechamento e Abertura

Observando-se a FIGURA 6.7, percebe-se que não é possível analisar a taxa de dissipação das oscilações com este método de resolução, nem mesmo o tempo de estabilização do transiente, entre a partida da manobra até a nova condição permanente.

Analisando-se os resultados conclui-se que os critérios da ELETROBRÁS para estudos de viabilidade e projetos de PCH's são conservadores. O método se

demonstrou mais conservador para o evento do fechamento. Isto pode ser explicado pelo valor  $Y_e$  obtido no cálculo.

Os estudos de definição de chaminés de equilíbrio em PCH's considerando estes critérios poderão apresentar resultados anti-econômicos. Estes critérios deverão ser considerados para projetos de UHE's até a fase de viabilidade e para PCH's até a fase de projeto básico. Para qualquer outra etapa do projeto de uma chaminé de equilíbrio, além do projeto básico, deve-se estudar as oscilações de água através de cálculos mais elaborados.

A variação obtida dos resultados para o caso do fechamento foi de 37,0% a mais e para o caso da abertura foi de 2,6 % a menos.

## 6.5 EDO2 x WANDA-CR x DF-LAX

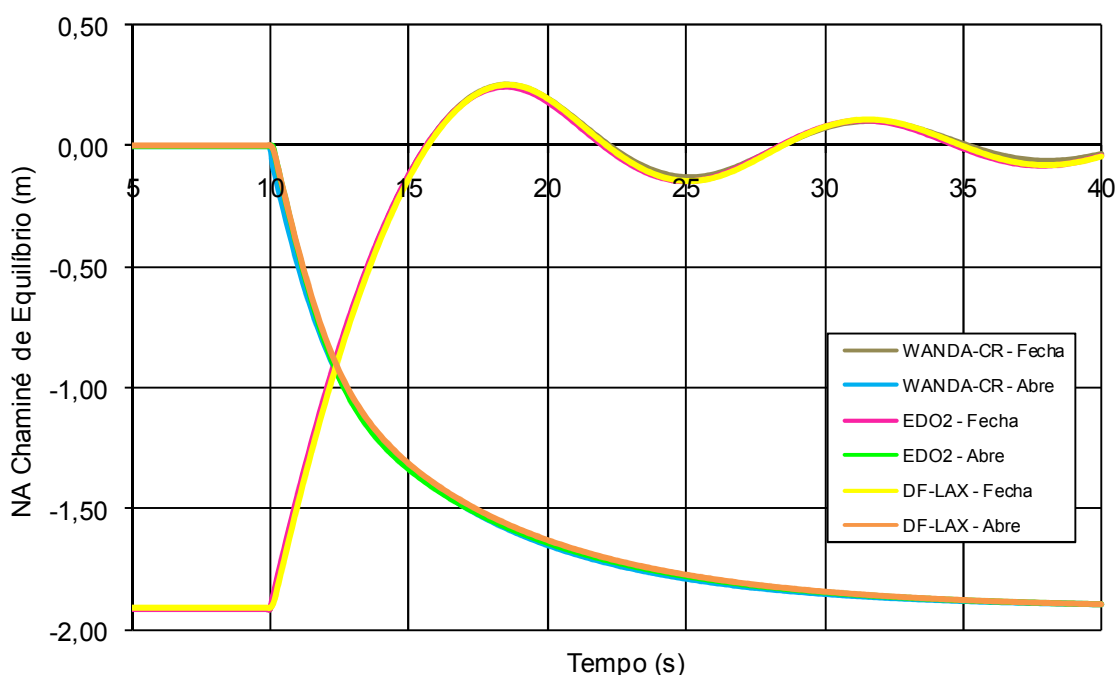


FIGURA 6.8 – Comparação EDO2xWANDA-CRxDF-LAX – Caso Fechamento e Abertura

A FIGURA 6.8 mostra que as variações entre os resultados de EDO2, Wanda-CR e DF-Lax é muito sutil, principalmente entre EDO2 e DF-Lax.

Cabe ressaltar que os três modelos de resolução analisados foram calibrados de forma diferente:

a) O EDO2 não considerou perdas de carga de entrada no conduto, nem da chaminé de equilíbrio, porém obteve coeficiente total maior que os demais para indicar uma perda de carga do escoamento permanente na seção da chaminé de 1,91 m.

b) O Wanda-CR recebeu coeficiente de perda de carga total diferente dos demais para resultar, na chaminé, uma perda de carga do escoamento permanente idêntica aos outros modelos, mas é possível que o programa considere algum tipo de perda na entrada. O manual não apresenta comentários sobre este assunto.

c) Pelo modelo DF-Lax admitiu-se um fator de rugosidade do conduto de 0,031 e perdas localizadas na tomada d'água e na chaminé.

Mesmo assim, no caso do protótipo em estudo, que tem alto grau de segurança (a área da chaminé de equilíbrio bastante maior em relação à área de Thoma), os três modelos de cálculo apresentaram resultados muito semelhantes.

É relevante observar que cada modelo tem sua particularidade em termos de disponibilização ao usuário, interface usuário/ferramenta, complexidade do manuseio e tempo de resolução.

Em termos de facilidade, o modelo da EDO apresenta-se mais favorável em todos os aspectos acima citados. É mais simples de ser programado, como, por exemplo, em ferramentas como o Excel e produz resultados com pouco tempo de processamento. Porém, ainda não foi analisado para casos onde a resposta dinâmica do transiente é mais sensível.

O modelo DF-Lax exige um melhor entendimento da sua física (equações diferenciais parciais, programação das rotinas computacionais, condições de contorno), mas é um método que resolve as equações do escoamento não-permanente em condutos na forma não linear. O esquema de Lax é explícito, sendo indispensável o uso de ferramentas computacionais que considerem períodos de tempo de cálculo pequenos, respeitando a condição de Courant. Deve ser programado em linguagem como *Mathlab*, *C*, *Turbo Pascal*, *Fortran* e etc. E o tempo médio com que se esperou por cada resultado foi de aproximadamente 30 minutos.

O Wanda-CR tem uma interface mais amigável, mas depende de muitas informações para executar o cálculo por se tratar de uma ferramenta complexa. Com este modelo comercial pode-se estudar outros fluidos, com diversas funções de operação de válvulas, em outros sistemas de unidades e até mesmo redes

complexas de condutos. Possui tempo de resolução razoável (para estes estudos durou aproximadamente 2 minutos por processamento) que depende da sua complexidade e período de integração adotado. Mas pode ser levado em conta o custo, por se tratar de um *software* completo preparado pelo laboratório da Universidade de Delft na Holanda e consolidado no mercado.



## **7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES**

### **7.1 GERAL**

Nesta dissertação foram comparados diferentes métodos para simulação de chaminés de equilíbrio que podem ser usados para projetos de circuitos de geração de UHEs. A partir de diferentes formulações teóricas e aplicações computacionais obteve-se resultados próximos que descreveram o fenômeno das oscilações de massa na chaminé de equilíbrio do protótipo.

É provável que a geometria, característica de resistência e as condições de contornos definidas têm mais influência na validade dos resultados do que a técnica de solução avaliada.

Cabe ao projetista analisar a necessidade de detalhamento do cálculo para o caso de chaminés de equilíbrio de UHEs. Quanto mais sensível for a inércia dos conjuntos mecânicos e do escoamento no circuito de geração, possivelmente serão necessárias análises mais refinadas que envolvem a ruptura da coluna d'água.

Mesmo quando adotado um modelo confiável para o cálculo dos transientes na chaminé de equilíbrio, por se tratar de um empreendimento do porte de uma usina hidrelétrica, deve ser considerado um coeficiente de segurança representativo.

A seguir são apresentados comentários específicos sobre os métodos e critérios considerados.

### **7.2 MODELO DE ACELERAÇÃO DA MASSA DE ÁGUA NO CONDUTO DE ADUÇÃO**

Para o estudo de caso analisado, este método se mostrou satisfatório. Observou-se variações nos resultados quando se admitiu períodos de integração maiores. É necessário considerar para o cálculo intervalos de tempo pequenos ( $\leq 0,1$  segundos).

### 7.3 ESQUEMA DIFUSIVO DE LAX

Foi desenvolvido com sucesso um método de resolução das equações dos escoamentos não-permanente não linear em condutos, considerando uma chaminé de equilíbrio como condição de contorno interior, implementado na linguagem computacional *Turbo Pascal*.

De acordo com o resultado do estudo de caso, o esquema difusivo de Lax mostrou-se adequado, estável e convergente, sempre quando for considerada a condição de *Courant* nas etapas de discretização.

### 7.4 ESQUEMA DE DIFERENÇAS FINITAS LINEARIZADO POR PREISSMANN

O sistema de equações constituído pelo esquema linearizado de Preissmann, após as primeiras iterações, apresentou resultados instáveis, mesmo respeitando-se a condição de estabilidade de Courant, que deve ser considerada no caso de esquemas de diferenças finitas explícitos. Analisando-se os resultados obtidos, concluiu-se que a instabilidade está relacionada com o método da Dupla-varredura, usado para solucionar o sistema de equações lineares, em cada intervalo de tempo.

O método da Dupla-varredura é muito eficiente para solucionar sistemas de equações dispersos (quadradiagonais) de grande dimensões (maiores do que 1000 equações), quando não existe a necessidade de efetuar a escolha de pivô. Geralmente nestas situações, pode-se empregar o método de eliminação de Gauss com pivotamento total ou métodos iterativos. O uso destes métodos para a obtenção de resultados pelo esquema de discretização linearizado de Preissmann tornam esta solução pouco competitiva em relação aos esquema de diferenças finitas explícitos, que solucionam o sistema de equações diferenciais sem a necessidade de linearização.

### 7.5 RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

A fórmula de Darcy-Weisbach corresponde à perda de carga para escoamentos permanentes e quando aplicada para escoamentos não-permanentes

a resistência ao escoamento se dará maior quando comparada com as observações do protótipo. Conclui-se que desta forma obtêm-se resultados mais conservadores.

## 7.6 GOLPE DE ARÍETE OBSERVADO NO SENSOR

Nas ligações extremas do conduto forçado do protótipo utilizou-se um material de *neoprene* para execução de curvas brandas e ligações com os dispositivos de montante e jusante. Este material, por ser altamente flexível, pode ter influenciado no golpe de aríete e variado pontualmente a seção transversal do conduto.

Para o caso de abertura da válvula, com a diminuição brusca da seção do escoamento, a velocidade instantânea se torna mais alta, fazendo com que exista maior perda de carga. Com isto, o amortecimento no início do fenômeno poderá ser maior.

Para o caso do fechamento, com a aumento brusco da seção do escoamento, a velocidade instantânea se torna mais baixa, fazendo com que exista menor perda de carga. Com isto, o amortecimento no início do fenômeno poderá ser menor.

## 7.7 FORÇA DE INÉRCIA E TENSÃO SUPERFICIAL NA CHAMINÉ

Nenhuma das equações envolvidas para resolver as oscilações na chaminé de equilíbrio apresentam um parâmetro que considera a quantidade de força de inércia da massa de água no interior da chaminé. A força que envolve a massa e a gravidade da água do escoamento do interior da chaminé influencia na resistência ao movimento de subida e ajuda no movimento de descida do nível de água.

Principalmente após as manobras de abertura, observou-se um fluxo substancial de água na parede de acrílico da chaminé, indicando que a seção efetiva de escoamento não era integral e o volume escoado também.

Uma possível explicação: a tensão superficial da água no interior da chaminé de equilíbrio tem maior interferência no escoamento.

## 7.8 RECOMENDAÇÕES

- a) Estudar maneiras de implementar a força de inércia da água do interior da chaminé de equilíbrio para resolver mais fielmente as oscilações de chaminés de equilíbrio;
- b) Produzir, aplicar, estudar e validar uma ferramenta própria para resolver circuitos de geração (montante da válvula) de UHEs, de fácil operação;
- c) Aplicar o esquema difusivo de Lax para condutos com outras condições de contorno e redes complexas;
- d) Desenvolver métodos computacionais para solucionar as equações do escoamento não-permanente em condutos utilizando métodos de volumes finitos e outros esquemas de diferenças finitas;
- e) Solucionar o esquema de diferenças finitas linearizado de Preissmann usando o método de eliminação de Gauss.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, G. C., e PALMIER, L. R. **Análise Comparativa entre Métodos de Cálculo do Escoamento Transitório com Fator de Atrito Não Permanente**. Golder Associates – IAHR, AIH, - Congresso Latino Americano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, out. 2006.

www.aneel.gov.br, 2009.

ASCE, **Civil Engineering Guidelines for Planning and Designing Hydroelectric Developments – Volume 2 – Waterways**. Published by the American Society of Civil Engineers. New York, 1989.

BERGANT, A., VÍTKOVSKÝ, J., SIMPSON, A. R., e LAMBERT, M. **Valve Induced Transients Influenced by Unsteady Pipe Flow Friction**. 10th International Meeting of the Work Group on: The Behaviour of Hydraulic Machinery Under Steady Oscillatory Conditions.- IAHR – AIH. Trondheim. Norway, 2001.

BRUNONE, B., KARNEY, B. W., MECARELLI, M., e FERRANTE, M. **Velocity Profiles and Unsteady Pipe Friction in Transient Flow**. Journal of Water Resources Planning and Management, jul/aug. 2000.

CALAME, J., et GADEN, D. **Theorie des Chambres d'Equilibre**. Ed. De la Concorde. Lausanne, 1926.

CARDOSO, B. **Competitividade Industrial**. Revista Conjuntura Econômica, out. 2008.

CASTANHARO, G. **Aplicação de modelos hidrodinâmicos no contexto de previsão de afluentes a reservatórios**, Dissertação de mestrado. Curitiba UFPR, CEHPAR, 2003.

CHAUDRY, M. H. **Applied Hydraulics Transients**. Editor Van Nostrand Reinhold Company. New York, 1987.

DELFT HYDRAULICS. **WANDA 3 – User Manual**. Delft, 2001.

ELETROBRÁS, **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (Minuta para Revisão)**. CBDB ICOLD. 2001.

ELETROBRÁS, **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. CBDB ICOLD. 2003.

ELETROBRÁS, **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. ELETROBRÁS. 2000.

ELETROBRÁS, **Manual Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas**. ELETROBRÁS. 1984.

ELETROBRÁS, MME, D.N.A.E.E. **Manual de Minicentraís Hidrelétrica**. FINEP. 1985.

HOFFMANN, L. **Análise de Transiente Hidráulico em Sistema com Chaminé de Equilíbrio – Desenvolvimento de Plataforma de Monitoramento Eletrônico** – Relatório Final de 1 ano de Iniciação Científica do Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFPR. Curitiba, 2008.

KAVISKI, E. e FRANCO, P.N.C. **Método Computacional para Solução das Equações do Escoamento Transitório em Condutos** – 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Foz do Iguaçu, 1997.

KAVISKI, E., CUMIN, L. M. G., PRADO, A. L. **Solução das Equações do Escoamento Transitório em Condutos pelo Esquema de Preissmann**. XXVII CILAMCE, 2006, Belém. Proceedings of the XXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2006.

LESSA, R. C. Transientes Hidráulicos em Sistemas Complexos de Adução de Água. Dissertação de Mestrado. EESC/USP, 1984.

LIGGETT, J.A., CUNGE, J.A. **Numerical Methods of solution of the unsteady flow equations**. In: MAHMOOD, K., YEVJEVICH, V. Unsteady flow in open channels, Fort Collins: Water Resources Publ., 1975. v.1.

MASON, J. **Estruturas de Aproveitamentos Hidrelétricos**. Editora Campus, Sondotécnica S.A. Rio de Janeiro, 1988.

MACINTYRE, A.M. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Editora Guanabara Dois S.A. Rio de Janeiro, 1983.

MIRANDA, de J. C. Neto. **Câmaras ou Chaminé de Equilíbrio**. Texto para Correção para o Livro (Pré-Minuta) Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétrica. 2000.

PINTO, N. L. de S. **Hidráulica Aplicada**. Apostila do antigo Curso de Pós Graduação em Engenharia Hidráulica. UFPR - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1987.

STEINSTRASSER, C. E. Método Difusivo de LAX Aplicado na Solução das Equações de Saint Venant. Dissertação de mestrado. Curitiba UFPR, CEHPAR, 2005.

STREETER, V. L., e WYLIE, E. B. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1982. 7ª ed.

WYLIE, E.B., and STREETER, V.L. 1978. **Fluid Transients**. McGraw-Hill, 1978.

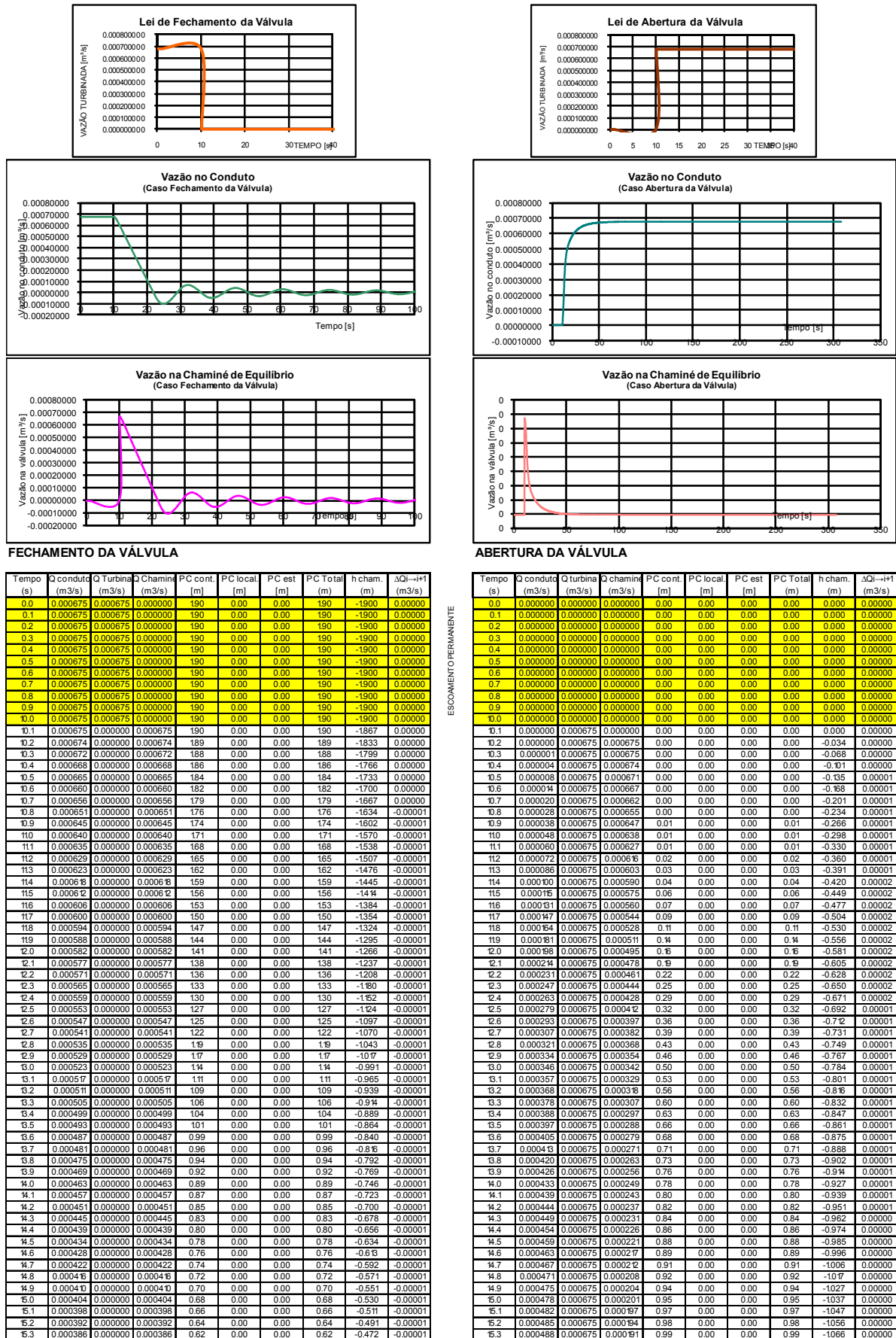
## **APÊNDICES**

### **APÊNDICE 1 – RESULTADOS EDO1**



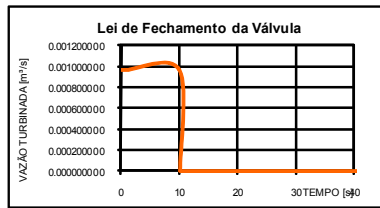
Fator de perda de carga estrangulamento da chaminé = 0.0000  
Fator de fechamento da válvula = 0.00

Fator do crescimento da vazão na válvula = 0.00

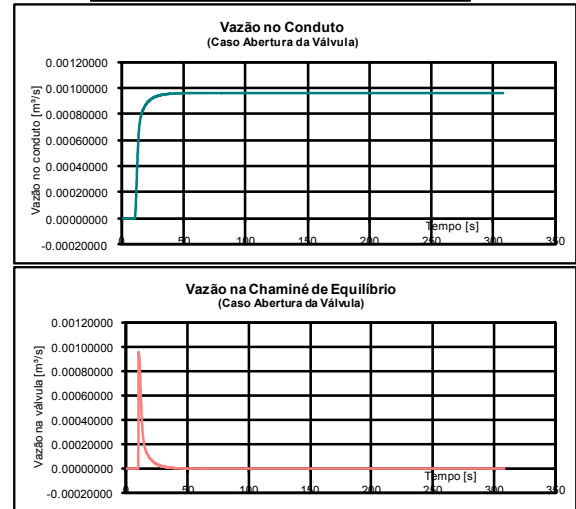
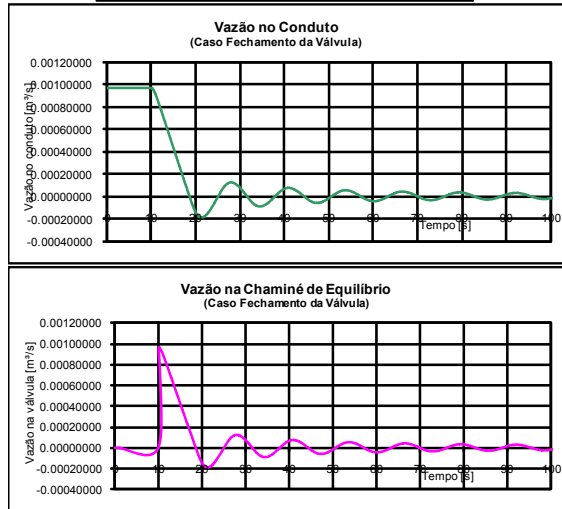
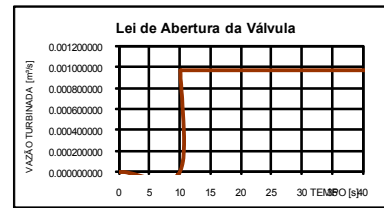


## **APENDICE 2 – RESULTADOS EDO2**

Fator de perda de carga estrangulamento da chaminé = 0.0000  
Fator de fechamento da válvula = 0.00



Fator do crescimento da vazão na válvula = 0.00



#### FECHAMENTO DA VÁLVULA

Tempo (s)	Q conduto (m³/s)	Q Turbina (m³/s)	Q Chaminé (m³/s)	PC cont. (m)	PC local (m)	PC est (m)	PC Total (m)	h cham. (m)	ΔQi→i+1 (m³/s)
0.0	0.000964	0.000964	0.000000	191	0.00	0.00	191	-19.0	0.000000
0.1	0.000964	0.000964	0.000000	191	0.00	0.00	191	-19.0	0.000000
0.2	0.000964	0.000964	0.000000	191	0.00	0.00	191	-19.0	0.000000
0.3	0.000964	0.000964	0.000000	191	0.00	0.00	191	-19.0	0.000000
0.4	0.000964	0.000964	0.000000	191	0.00	0.00	191	-19.0	0.000000
0.5	0.000964	0.000964	0.000000	191	0.00	0.00	191	-19.0	0.000000
0.6	0.000964	0.000964	0.000000	191	0.00	0.00	191	-19.0	0.000000
0.7	0.000964	0.000964	0.000000	191	0.00	0.00	191	-19.0	0.000000
0.8	0.000964	0.000964	0.000000	191	0.00	0.00	191	-19.0	0.000000
0.9	0.000964	0.000964	0.000000	191	0.00	0.00	191	-19.0	0.000000
1.0	0.000964	0.000964	0.000000	191	0.00	0.00	191	-19.0	0.000000
10.1	0.000964	0.000000	0.000964	191	0.00	0.00	191	-18.62	0.000000
10.2	0.000962	0.000000	0.000962	190	0.00	0.00	190	-18.13	0.000000
10.3	0.000957	0.000000	0.000957	188	0.00	0.00	188	-17.66	-0.000001
10.4	0.000952	0.000000	0.000952	186	0.00	0.00	186	-17.18	-0.000001
10.5	0.000945	0.000000	0.000945	183	0.00	0.00	183	-16.71	-0.000001
10.6	0.000937	0.000000	0.000937	180	0.00	0.00	180	-16.24	-0.000001
10.7	0.000928	0.000000	0.000928	177	0.00	0.00	177	-15.77	-0.000001
10.8	0.000919	0.000000	0.000919	173	0.00	0.00	173	-15.31	-0.000001
10.9	0.000909	0.000000	0.000909	170	0.00	0.00	170	-14.86	-0.000001
11.0	0.000899	0.000000	0.000899	166	0.00	0.00	166	-14.41	-0.000001
11.1	0.000888	0.000000	0.000888	162	0.00	0.00	162	-13.96	-0.000001
11.2	0.000877	0.000000	0.000877	158	0.00	0.00	158	-13.52	-0.000001
11.3	0.000866	0.000000	0.000866	154	0.00	0.00	154	-13.09	-0.000001
11.4	0.000855	0.000000	0.000855	150	0.00	0.00	150	-12.66	-0.000001
11.5	0.000843	0.000000	0.000843	146	0.00	0.00	146	-12.24	-0.000001
11.6	0.000832	0.000000	0.000832	142	0.00	0.00	142	-11.82	-0.000001
11.7	0.000820	0.000000	0.000820	138	0.00	0.00	138	-11.41	-0.000001
11.8	0.000809	0.000000	0.000809	134	0.00	0.00	134	-11.01	-0.000001
11.9	0.000797	0.000000	0.000797	131	0.00	0.00	131	-10.61	-0.000001
12.0	0.000785	0.000000	0.000785	127	0.00	0.00	127	-10.22	-0.000001
12.1	0.000773	0.000000	0.000773	123	0.00	0.00	123	-9.83	-0.000001
12.2	0.000761	0.000000	0.000761	119	0.00	0.00	119	-9.45	-0.000001
12.3	0.000749	0.000000	0.000749	115	0.00	0.00	115	-9.07	-0.000001
12.4	0.000737	0.000000	0.000737	112	0.00	0.00	112	-8.71	-0.000001
12.5	0.000725	0.000000	0.000725	108	0.00	0.00	108	-8.34	-0.000001
12.6	0.000714	0.000000	0.000714	105	0.00	0.00	105	-7.99	-0.000001
12.7	0.000702	0.000000	0.000702	101	0.00	0.00	101	-7.63	-0.000001
12.8	0.000690	0.000000	0.000690	98	0.00	0.00	98	-7.29	-0.000001
12.9	0.000678	0.000000	0.000678	94	0.00	0.00	94	-6.95	-0.000001
13.0	0.000665	0.000000	0.000665	91	0.00	0.00	91	-6.62	-0.000001
13.1	0.000653	0.000000	0.000653	88	0.00	0.00	88	-6.29	-0.000001
13.2	0.000641	0.000000	0.000641	85	0.00	0.00	85	-5.97	-0.000001
13.3	0.000629	0.000000	0.000629	81	0.00	0.00	81	-5.65	-0.000001
13.4	0.000617	0.000000	0.000617	78	0.00	0.00	78	-5.35	-0.000001
13.5	0.000605	0.000000	0.000605	75	0.00	0.00	75	-5.04	-0.000001
13.6	0.000593	0.000000	0.000593	72	0.00	0.00	72	-4.75	-0.000001
13.7	0.000581	0.000000	0.000581	69	0.00	0.00	69	-4.45	-0.000001
13.8	0.000569	0.000000	0.000569	67	0.00	0.00	67	-4.17	-0.000001
13.9	0.000557	0.000000	0.000557	64	0.00	0.00	64	-3.89	-0.000001
14.0	0.000545	0.000000	0.000545	61	0.00	0.00	61	-3.62	-0.000001
14.1	0.000533	0.000000	0.000533	58	0.00	0.00	58	-3.35	-0.000001
14.2	0.000521	0.000000	0.000521	56	0.00	0.00	56	-3.09	-0.000001
14.3	0.000509	0.000000	0.000509	53	0.00	0.00	53	-2.84	-0.000001
14.4	0.000497	0.000000	0.000497	51	0.00	0.00	51	-2.59	-0.000001
14.5	0.000485	0.000000	0.000485	48	0.00	0.00	48	-2.34	-0.000001
14.6	0.000473	0.000000	0.000473	46	0.00	0.00	46	-2.11	-0.000001
14.7	0.000461	0.000000	0.000461	44	0.00	0.00	44	-1.88	-0.000001
14.8	0.000449	0.000000	0.000449	41	0.00	0.00	41	-1.65	-0.000001
14.9	0.000437	0.000000	0.000437	39	0.00	0.00	39	-1.43	-0.000001
15.0	0.000425	0.000000	0.000425	37	0.00	0.00	37	-1.22	-0.000001
15.1	0.000413	0.000000	0.000413	35	0.00	0.00	35	-1.02	-0.000001
15.2	0.000401	0.000000	0.000401	33	0.00	0.00	33	-0.81	-0.000001
15.3	0.000389	0.000000	0.000389	31	0.00	0.00	31	-0.62	-0.000001

#### ABERTURA DA VÁLVULA

Tempo (s)	Q conduto (m³/s)	Q turbina (m³/s)	Q chaminé (m³/s)	PC cont. [m]	PC local [m]	PC est [m]	PC Total (m)	h cham. (m)	ΔQi→i+1 (m³/s)
0.0	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000000
0.1	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000000
0.2	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000000
0.3	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000000
0.4	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000000
0.5	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000000
0.6	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000000
0.7	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000000
0.8	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000000
0.9	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000000
10.0	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000000
10.1	0.000000	0.000964	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000000
10.2	0.000000	0.000964	0.000964	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.048	0.000000
10.3	0.000002	0.000964	0.000964	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.096	0.000000
10.4	0.000007	0.000964	0.000962	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.145	0.000001
10.5	0.000014	0.000964	0.000957	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.193	0.000001
10.6	0.000023	0.000964	0.000950	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.240	0.000001
10.7	0.000035	0.000964	0.000941	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.287	0.000001
10.8	0.000049	0.000964	0.000929	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.334	0.000002
10.9	0.000065	0.000964	0.000915	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.379	0.000002
11.0	0.000083	0.000964	0.000899	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.424	0.000002
11.1	0.000102	0.000964	0.000881	0.02	0.00	0.00	0.02	-0.469	0.000002
11.2	0.000124	0.000964	0.000862	0.03	0.00	0.00	0.03	-0.512	0.000002
11.3	0.000147	0.000964	0.000840	0.04	0.00	0.00	0.04	-0.554	0.000002
11.4	0.000172	0.000964	0.000817	0.06	0.00	0.00	0.06	-0.595	0.000003
11.5	0.000198	0.000964	0.000792	0.08	0.00	0.00	0.08	-0.634	0.000003
11.6	0.000225	0.000964	0.000766	0.10	0.00	0.00	0.10	-0.673	0.000003
11.7	0.000252	0.000964	0.000739	0.13	0.00	0.00	0.13	-0.710	0.000003
11.8	0.000280	0.000964	0.000712	0.16	0.00	0.00	0.16	-0.745	0.000003
11.9	0.000308	0.000964	0.000684	0.20	0.00	0.00	0.20	-0.779	0.000003
12.0	0.000337	0.000964	0.000656	0.23	0.00	0.00	0.23	-0.812	0.000003
12.1	0.000365	0.000964	0.000627	0.27	0.00	0.00	0.27	-0.844	0.000003
12.2	0.000392	0.000964	0.000599	0.32	0.00	0.00	0.32	-0.874	0.000003
12.3	0.000419	0.000964	0.000572	0.36	0.00	0.00	0.36	-0.902	0.000003
12.4	0.000446	0.000964	0.000545	0.41	0.00	0.00	0.41	-0.930	0.000003
12.5	0.000471	0.000964	0.000518	0.46	0.00	0.00	0.46	-0.955	0.000002
12.6	0.000495	0.000964	0.000493	0.50	0.00	0.00	0.50	-0.980	0.000002
12.7	0.000518	0.000964	0.000469	0.55	0.00	0.00	0.55	-1.004	0.000002
12.8	0.000540	0.000964	0.000446	0.60	0.00	0.00	0.60	-1.026	0.000002
12.9	0.000561	0.000964	0.000424	0.65	0.00	0.00	0.65	-1.047	0.000002
13.0	0.000580	0.000964	0.000403	0.69	0.00	0.00	0.69	-1.067	0.000002
13.1	0.000598	0.000964	0.000384	0.74	0.00	0.00	0.74	-1.087	0.000002
13.2	0.000615	0.000964	0.000366	0.78	0.00	0.00	0.78	-1.105	0.000002
13.3	0.000631	0.000964	0.000349	0.82	0.00	0.00	0.82	-1.122	0.000001
13.4	0.000646	0.000964	0.000333	0.86	0.00	0.00	0.86	-1.139	0.000001
13.5	0.000659	0.000964	0.000318	0.89	0.00	0.00	0.89	-1.155	0.000001
13.6	0.000672	0.000964	0.000305	0.93	0.00	0.00	0.93	-1.170	0.000001
13.7	0.000684	0.000964	0.000292	0.96	0.00	0.00	0.96	-1.185	0.000001
13.8	0.000695	0.000964	0.000280	0.99	0.00	0.00	0.99	-1.199	0.000001
13.9	0.000705	0.000964	0.000269	1.02	0.00	0.00	1.02	-1.212	0.000001
14.0	0.000714	0.000964	0.000259	1.05	0.00	0.00	1.05	-1.225	0.000001
14.1	0.000723	0.000964	0.000250	1.07	0.00	0.00	1.07	-1.238	0.000001
14.2	0.000731	0.000964	0.000241	1.10	0.00	0.00	1.10	-1.250	0.000001
14.3	0.000738	0.000964	0.000232	1.12	0.00	0.00	1.12	-1.262	0.000001
14.4	0.000744	0.000964	0.000224	1.15	0.00	0.00	1.15	-1.273	0.000001
14.5	0.000751	0.000964	0.000219	1.18	0.00	0.00	1.18	-1.284	0.000001
14.6	0.000757	0.000964	0.000213	1.20	0.00	0.00	1.18	-1.294	0.000001
14.7	0.000763	0.000964	0.000207	1.20	0.00	0.00	1.20	-1.305	0.000001
14.8	0.000768	0.000964	0.000201	1.21	0.00	0.00	1.21	-1.315	0.000000
14.9	0.000773	0.000964	0.000196	1.23	0.00	0.00	1.23	-1.325	0.000000
15.0	0.000778	0.000964	0.000191	1.24	0.00	0.00	1.24	-1.334	0.000000
15.1	0.000782	0.000964	0.000186	1.26	0.00	0.00	1.26	-1.344	0.000000
15.2	0.000786	0.000964	0.000182	1.27	0.00	0.00	1.27	-1.353	0.000000
15.3	0.000790	0.000964	0.000178	1.28	0.00	0.00	1.28	-1.362	0.000000

### **APÊNDICE 3 – INTERFACE/RESULTADOS WANDA**

WANDA-CR:

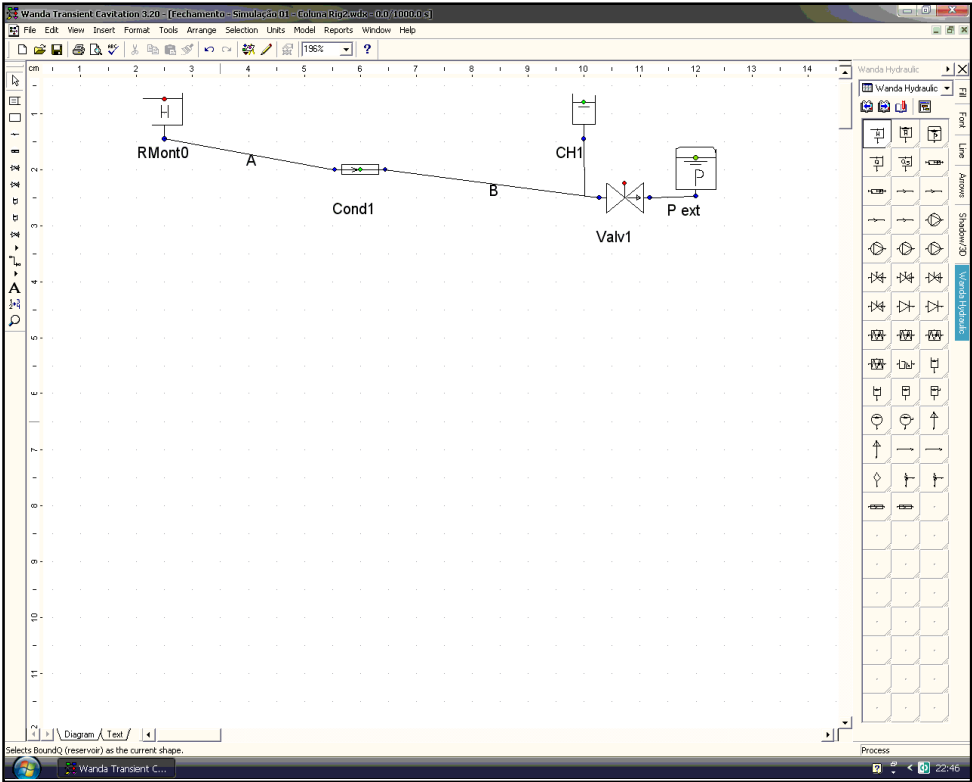


FIGURA 9.3 – Interface Visual do Modelo Wanda - Simulação WMC-01-CR

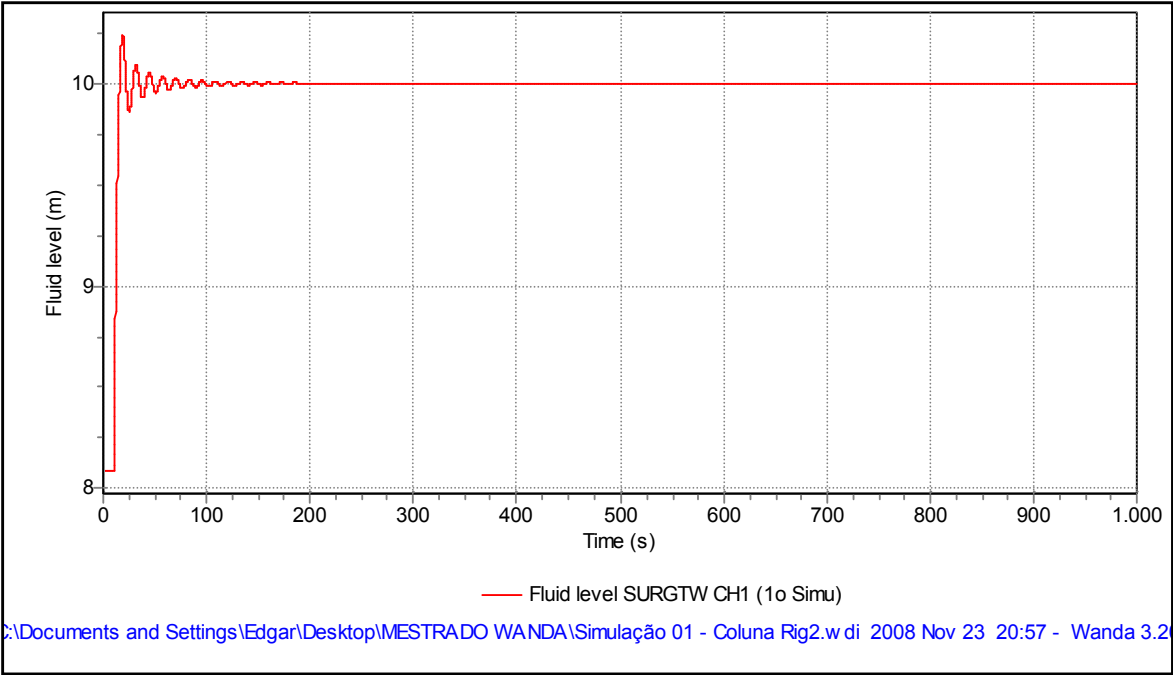


FIGURA 9.4 – Resultado da Oscilação d'Água - Fechamento - Simulação WMC-01-CR

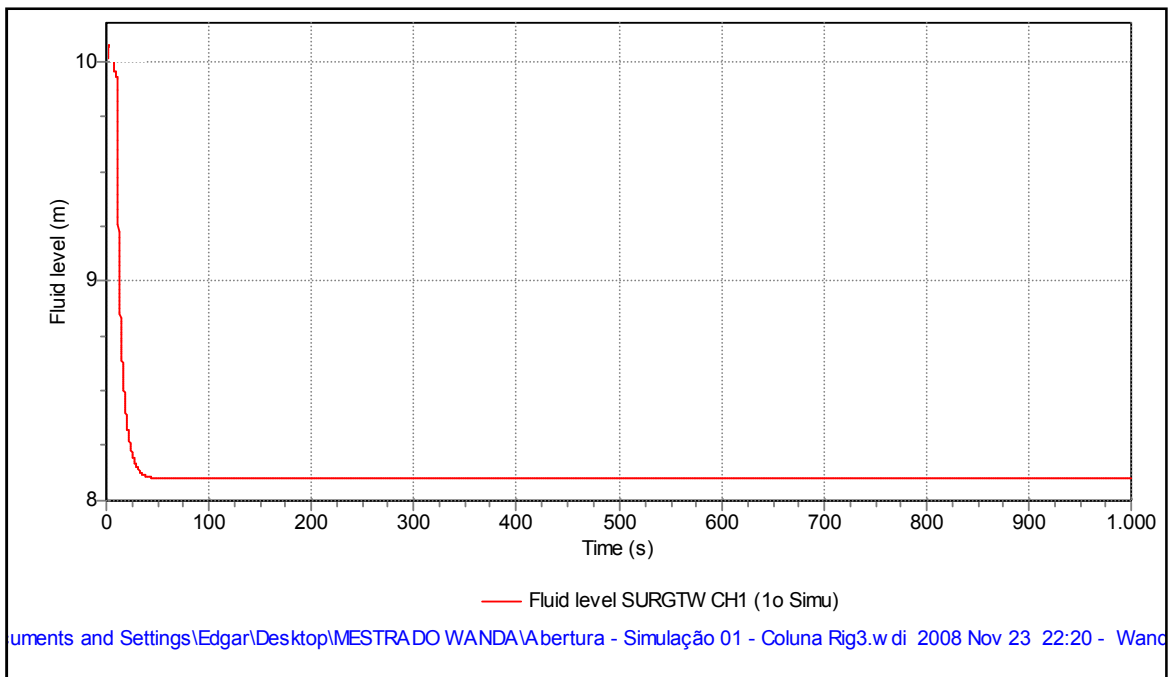


FIGURA 9.5 – Resultado da Oscilação d'Água - Abertura - Simulação WMC-01-CR

WANDA-CM:

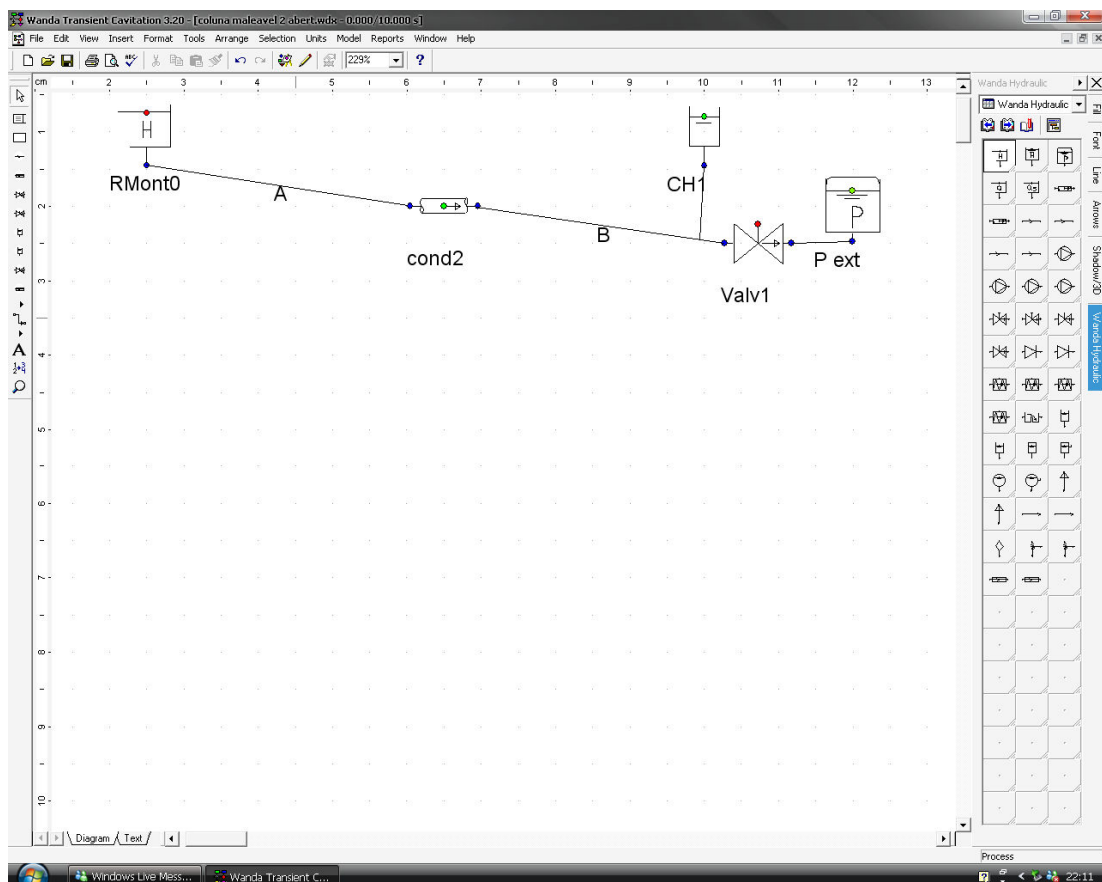
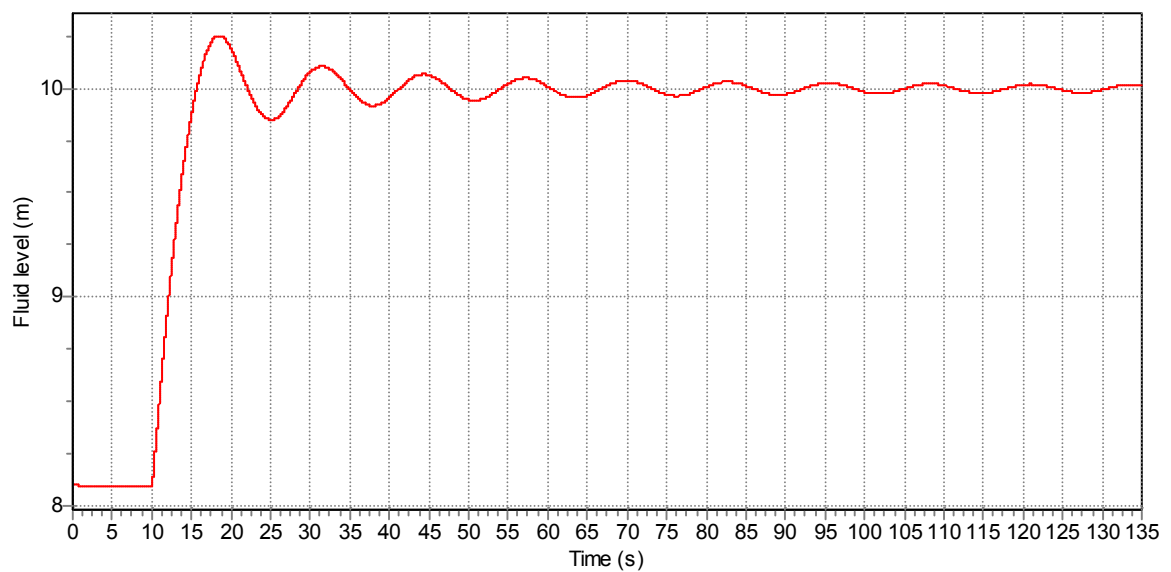
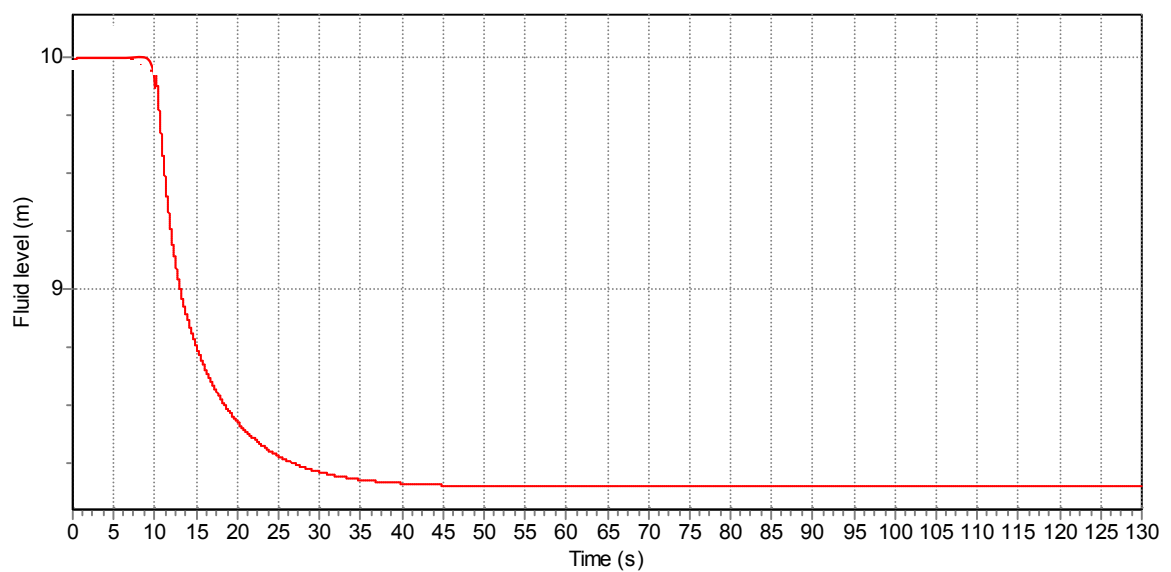


FIGURA 9.6 – Interface Visual do Modelo Wanda - Simulação WMC-CR



ments and Settings\Edgar\Desktop\MESTRADO WANDA\segunda tente ,aleavel\coluna maleavel 2.w di 2009 Mrt 24 20:58 - Wan

FIGURA 9.7 – Resultado da Oscilação d'Água - Abertura - Simulação WMC-CM



nts and Settings\Edgar\Desktop\MESTRADO WANDA\segunda tente ,aleavel\coluna maleavel 2 abert.w di 2009 Mrt 26 22:33 - V

FIGURA 9.8 – Resultado da Oscilação d'Água - Abertura - Simulação WMC-CM

## **APÊNDICE 4 – PROGRAMAÇÃO LAX**



## FECHAMENTO:

```
program fecha02;
{  Chaminé de equilíbrio - Método de Lax
  Análise de fechamento da válvula
  Autores: Kaviski,E. e Andrzejewski,E.A.
  Versão: 03/2009
}

uses
  wincrt;

type
  vet0 = array[1..2] of integer;
  vet1 = array[1..2] of double;
  vet2 = array[0..2000] of double;

var
  arq      : text;
  nx       : vet0;
  v,h      : array[1..2,1..2] of ^vet2;
  dx,
  st,
  qch,
  hch,
  qvs,
  a1,a2,
  a3       : vet1;
  t,dt,
  b1,b2,
  b3       : double;
  ndt,
  idt,
  i,j      : integer;

const
  lt : vet1 = (12.21e0, 0.30e0 );      {comprimento tubos}
  at : vet1 = ( 6.026e-4,6.026e-4);    {área tubos}
  rt : vet1 = ( 6.925e-3,6.925e-3);    {rh tubos}
  ft : vet1 = ( 3.1e-2, 3.1e-2 );      {coeficiente de
rugosidade total tubos}
  a  : vet1 = ( 1.28e3, 1.28e3 );      {celeridade tubos}
  ac : double = 1.9981e-3;              {área chamine}
```

```

    zr : double = 1.0e1;      {elevação do nível do
reservatório (estático)}
    z0 : double = 9.35e0;      {elevação da tomada de água -
ponto "zero"}
    zt : double = 7.56e0;      {elevação da base da chaminé}
    q0 : double = 9.64e-4;      {vazão inicial}
    h1 : double = 1.91e0;      {perda de carga inicial}
    g  : double = 9.81e0;      {aceleração da gravidade}
    ta : double = 1.2e2;      {tempo de cálculo}
    tf : double = 0.2e0;      {tempo de fechamento da válvula}
    kr : double = 1.0e0;
    kc : double = 1.0e0;

procedure inic_dad;

var
    aux : double;
    i,j : integer;

begin

    nx[1] := 1000;            {partição do tubo1}
    dx[1] := lt[1]/nx[1];
    nx[2] := trunc(lt[2]/dx[1]) + 1;    {partição do tubo2}
    dx[2] := lt[2]/nx[2];    dt      := 0.8e0*dx[1]/a[1];
{definição do delta t}
    ndt := trunc(0.01e0/dt); {Definição do delta t da valvula}
    (*
    if ndt < 200
    then
        ndt := 1
    else
        ndt := ndt div 100;
    *)
    writeln(dt,nx[1]:10,nx[2]:10,ndt:10);    {plotagem dos
valores}

    st[1] := (z0-zt)/lt[1];    {seno do ângulo do tubo1}
    st[2] := 0.0e0;            {seno do ângulo do tubo2}

    for i := 1 to 2 do
        begin
            a1[i] := ft[i]/(8.0e0*rt[i]);    {celeridade do tubo}

```

```

        a2[i] := a[i]*a[i]/g;           {coeficiente que inclui a
celeridade}
        a3[i] := 0.5e0/dx[i];           {coeficiente denominador}
        end;

        b1 := 0.5e0*kr/g;   {coeficiente perda de carga da tomada}
        b2 := 0.5e0*dt/ac;   {coeficiente de perda de carga de
saída}
        b3 := 0.5e0*kc/(ac*ac*g);       {coeficiente fator para o
cálculo}

        for i := 1 to 2 do
            begin
                aux := q0/at[i];           {velocidade inicial}
                for j := 0 to nx[i] do
                    v[i,2]^j := aux;
                end;

                h[1,2]^0 := zr - b1*aux*aux;; {perda de carga no tubo1}
                aux := h1/nx[1];             {distribuição da perda de
carga no tubo1}
                for j := 1 to nx[1] do       {perda de carga em cada
ponto}
                    h[1,2]^j := zr - j*aux;

                hch[2] := h[1,2]^nx[1];      {nível inicial na chaminé}
                qch[2] := 0.0e0;             {vazão inicial na chaminé}
                qvs[2] := q0;               {vazão inicial da válvula}

                h[2,2]^0 := hch[2];          {distribuição da perda de
carga no tubo2}
                aux := (h1/lt[1])*lt[2]/nx[2];
                for j := 1 to nx[2] do
                    h[2,2]^j := hch[2] - j*aux;

            end;

        procedure lax;

        var
            vm,hm,
            dvx,dhx : double;
            i,j      : integer;

```

```

begin

  for i := 1 to 2 do
    for j := 1 to nx[i]-1 do
      begin
        vm := 0.5e0*(v[i,1]^[j-1] + v[i,1]^[j+1]);
        hm := 0.5e0*(h[i,1]^[j-1] + h[i,1]^[j+1]);
        dvx := a3[i]*(v[i,1]^[j+1] - v[i,1]^[j-1]);
        dhx := a3[i]*(h[i,1]^[j+1] - h[i,1]^[j-1]);

        v[i,2]^[j] := vm - dt*(g*dhx + vm*dvx +
a1[i]*vm*abs(vm));
        h[i,2]^[j] := hm - dt*(a2[i]*dvx + vm*dhx +
vm*st[i]);
      end;
    end;
  end;

procedure reservatorio;

begin

  v[1,2]^[0] := v[1,2]^[1];
  h[1,2]^[0] := zr - b1*v[1,2]^[0]*abs(v[1,2]^[0]);

  end;

procedure chamine;

var
  aux : double;

begin

  v[1,2]^[nx[1]] := v[1,2]^[nx[1]-1];
  v[2,2]^[0] := v[2,2]^[1];

  qch[2] := v[1,2]^[nx[1]]*at[1] - v[2,2]^[0]*at[2];
  hch[2] := hch[1] + b2*(qch[1] + qch[2]);

  aux := b3*qch[2]*abs(qch[2]);
  h[1,2]^[nx[1]] := hch[2] + aux;
  h[2,2]^[0] := hch[2] - aux;

```

```

end;

procedure valvula;

var
    xl,ax,
    vl,h1 : double;
    j      : integer;

begin

    if t > tf
    then
        qvs[2] := 0.0e0
    else
        qvs[2] := (tf-t)*q0/tf;

    xl := lt[2] - a[2]*dt;
    j  := trunc(xl/dx[2]);
    ax := (xl - j*dx[2])/dx[2];
    vl := v[2,1]^[j] + (v[2,1]^[j+1] - v[2,1]^[j])*ax;
    h1 := h[2,1]^[j] + (h[2,1]^[j+1] - h[2,1]^[j])*ax;

    v[2,2]^[nx[2]] := qvs[2]/at[2];
    h[2,2]^[nx[2]] := h1 + a[2]*((vl - v[2,2]^[nx[2]])/g -
                                   dt*a1[2]*vl*abs(vl))

    end;

begin

    for i := 1 to 2 do
        for j := 1 to 2 do
            begin
                new(v[i,j]);
                new(h[i,j]);
            end;

        inic_dad;

        assign (arq,'lax_f02.txt');
        rewrite(arq);

        writeln(arq,0.0e0:10:5,' ',h[1,2]^[0],' ',hch[2],

```

```

        ' ',h[2,2]^[nx[2]]);

t    := dt;
idt := 0;
repeat

    hch[1] := hch[2];
    qch[1] := qch[2];
    qvs[1] := qvs[2];
    for i := 1 to 2 do
        begin
            v[i,1]^ := v[i,2]^;
            h[i,1]^ := h[i,2]^;
        end;

    lax;
    reservatorio;
    chamine;
    valvula;

    idt := idt + 1;
    if idt = ndt
    then
        begin
            idt := 0;
            writeln(t,' ',ta);
            writeln(arq,t:10:5,' ',h[1,2]^[0],' ',hch[2],
                ' ',h[2,2]^[nx[2]]);
        end;

    t := t + dt;
    until t > ta;

close(arq);

end.

```

## ABERTURA:

```
program Abre02;
{
  Chaminé de equilíbrio - Método de Lax
  Análise de abertura da válvula
  Autores: Kaviski,E. e Andrzejewski,E.A.
  Versão: 04/2009
}
uses
  wincrt;

type
  vet0 = array[1..2] of integer;
  vet1 = array[1..2] of double;
  vet2 = array[0..2000] of double;

var
  arq      : text;
  nx       : vet0;
  v,h      : array[1..2,1..2] of ^vet2;
  dx,
  st,
  qch,
  hch,
  qvs,
  a1,a2,
  a3       : vet1;
  t,dt,
  b1,b2,
  b3       : double;
  ndt,
  idt,
  i,j      : integer;

const
  lt : vet1 = (12.21e0, 0.30e0 );      {comprimento
tubos}
  at : vet1 = ( 6.026e-4,6.026e-4);    {área tubos}
  rt : vet1 = ( 6.925e-3,6.925e-3);    {rh tubos}
  ft : vet1 = ( 3.1e-2, 3.1e-2);      {coeficiente de
rugosidade total tubos}
  a  : vet1 = ( 1.28e3, 1.28e3 );      {celeridade tubos}
  ac : double = 1.9981e-3;              {área chamine}
```

```

        zr : double = 1.0e1;           {elevação do nível do
reservatório (estático)}
        z0 : double = 9.35e0;         {elevação da tomada de água -
ponto "zero"}
        zt : double = 7.56e0;         {elevação da base da chaminé}
        q0 : double = 9.64e-4;        {vazão final}
        h1 : double = 1.91e0;         {perda de carga inicial}
        g  : double = 9.81e0;         {aceleração da gravidade}
        ta : double = 1.2e2;           {tempo de cálculo}
        tf : double = 0.2e0;           {tempo p/abertura total da
válvula}
        kr : double = 1.0e0;
        kc : double = 1.0e0;

procedure inic_dad;

var
    aux : double;
    i,j : integer;

begin

    nx[1] := 1000;                     {partição do tubo1}
    dx[1] := lt[1]/nx[1];
    nx[2] := trunc(lt[2]/dx[1]) + 1;   {partição do tubo2}
    dx[2] := lt[2]/nx[2];
    dt     := 0.8e0*dx[1]/a[1];         {definição do delta t}

    ndt := trunc(0.01e0/dt); {Definição do delta t da valvula}
    (*
    if ndt < 200
    then
        ndt := 1
    else
        ndt := ndt div 100;
    *)

    writeln(dt,nx[1]:10,nx[2]:10,ndt:10); {plotagem dos
valores}

    st[1] := (z0-zt)/lt[1];             {seno do ângulo do tubo1}
    st[2] := 0.0e0;                     {seno do ângulo do tubo2}

```



```

for i := 1 to 2 do
begin
    a1[i] := ft[i]/(8.0e0*rt[i]);    {celeridade do tubo}
    a2[i] := a[i]*a[i]/g;           {coeficiente que
inclui a celeridade}
    a3[i] := 0.5e0/dx[i];           {coeficiente denominador}
end;

    b1 := 0.5e0*kr/g;    {coeficiente perda de carga da tomada}
    b2 := 0.5e0*dt/ac;   {coeficiente de perda de carga de
saída}
    b3 := 0.5e0*kc/(ac*ac*g);    {coeficiente fator para o
cálculo}

for i := 1 to 2 do      {CI: velocidade = 0 e carga = zr }
    for j := 0 to nx[i] do
        begin
            v[i,2]^j := 0.0e0;
            h[i,2]^j := zr;
        end;

    hch[2] := h[1,2]^[nx[1]];    {nível inicial na chaminé}
    qch[2] := 0.0e0;              {vazão inicial na chaminé}
    qvs[2] := 0.0e0;              {vazão inicial da valvula}

end;

procedure lax;

var
    vm,hm,
    dvx,dhx : double;
    i,j      : integer;

begin

for i := 1 to 2 do
    for j := 1 to nx[i]-1 do
        begin
            vm := 0.5e0*(v[i,1]^[j-1] + v[i,1]^[j+1]);
            hm := 0.5e0*(h[i,1]^[j-1] + h[i,1]^[j+1]);
            dvx := a3[i]*(v[i,1]^[j+1] - v[i,1]^[j-1]);
            dhx := a3[i]*(h[i,1]^[j+1] - h[i,1]^[j-1]);

```

```

        v[i,2]^[j] := vm - dt*(g*dhx + vm*dvx +
a1[i]*vm*abs(vm));
        h[i,2]^[j] := hm - dt*(a2[i]*dvx + vm*dhx +
vm*st[i]);
        end;

    end;

procedure reservatorio;

begin

    v[1,2]^[0] := v[1,2]^[1];
    h[1,2]^[0] := zr - b1*v[1,2]^[0]*abs(v[1,2]^[0]);

    end;

procedure chamine;

var
    aux : double;

begin

    v[1,2]^[nx[1]] := v[1,2]^[nx[1]-1];
    v[2,2]^[0]      := v[2,2]^[1];

    qch[2] := v[1,2]^[nx[1]]*at[1] - v[2,2]^[0]*at[2];
    hch[2] := hch[1] + b2*(qch[1] + qch[2]);

    aux := b3*qch[2]*abs(qch[2]);
    h[1,2]^[nx[1]] := hch[2] + aux;
    h[2,2]^[0]      := hch[2] - aux;

    end;

procedure valvula;

var
    xl,ax,
    vl,h1 : double;
    j      : integer;

begin

```

```

if t > tf
then
    qvs[2] := q0
else
    qvs[2] := t*q0/tf;

x1 := lt[2] - a[2]*dt;
j  := trunc(x1/dx[2]);
ax := (x1 - j*dx[2])/dx[2];
v1 := v[2,1]^j + (v[2,1]^(j+1) - v[2,1]^j)*ax;
h1 := h[2,1]^j + (h[2,1]^(j+1) - h[2,1]^j)*ax;

v[2,2]^[nx[2]] := qvs[2]/at[2];
h[2,2]^[nx[2]] := h1 + a[2]*((v1 - v[2,2]^[nx[2]])/g -
                             dt*a1[2]*v1*abs(v1))

end;

begin

for i := 1 to 2 do
    for j := 1 to 2 do
        begin
            new(v[i,j]);
            new(h[i,j]);
        end;

    inic_dad;

    assign (arq,'Abre_02.txt');
    rewrite(arq);

    writeln(arq,0.0e0:10:5,' ',h[1,2]^[0],' ',hch[2],
            ' ',h[2,2]^[nx[2]]);

    t := dt;
    idt := 0;
    repeat

        hch[1] := hch[2];
        qch[1] := qch[2];
        qvs[1] := qvs[2];

```

```

for i := 1 to 2 do
  begin
    v[i,1]^ := v[i,2]^;
    h[i,1]^ := h[i,2]^;
  end;

  lax;
  reservatorio;
  chamine;
  valvula;

  idt := idt + 1;
  if idt = ndt
  then
    begin
      idt := 0;
      writeln(t, ' ', ta);
      writeln(arq, t:10:5, ' ', h[1,2]^[0], ' ', hch[2],
        ' ', h[2,2]^[nx[2]]);
    end;

  t := t + dt;
  until t > ta;

close(arq);

end.

```

## **APÊNDICE 5 – RESULTADOS GERAIS**